



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**EXPERIMENTÁLNÍ STUDIUM MODIFIKÁTORŮ TŘENÍ V
KOLEJOVÉ DOPRAVĚ**

EXPERIMENTAL STUDY OF FRICTION MODIFIERS IN RAIL TRANSPORTATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Knápek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Radovan Galas

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Bc. Jiří Knápek
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Radovan Galas
Akademický rok:	2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Experimentální studium modifikátorů tření v kolejové dopravě

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Modifikátory tření představují efektivní způsob řízení adheze v kontaktu kola a kolejnice. V současnosti jsou tyto kompozice aplikovány zejména prostřednictvím stacionárních systémů, které jsou však nákladné na provoz a údržbu. Současným trendem je přechod na systémy umístěné přímo ve vozidle, přičemž aplikované množství modifikátoru tření je vyhodnocováno na základě aktuálních provozních a okolních podmínek.

Typ práce: výzkumná

Projekt: TAČR

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je stanovit optimální množství modifikátoru tření v závislosti na provozních a okolních podmínkách.

Dílčí cíle diplomové práce:

- zprovoznění experimentální aparatury,
- na základě odborných publikací stanovit významné parametry ovlivňující adhezi,
- experimentálně popsat vliv aplikovaného množství v závislosti na provozních a okolních podmínkách,
- navrhnout schéma řízení adaptivního systému pro řízení adheze,
- publikace výsledků.

Požadované výstupy: publikace, průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf

Seznam doporučené literatury:

Wheel-rail interface handbook. 1st pub. Editor R. Lewis, U. Olofsson. Cambridge: Woodhead, 2009, xxii, 842 s. Woodhead publishing in mechanical engineering. ISBN 978-1-84569-412-8.

ARIAS-CUEVAS, O., Z. LI, R. LEWIS a E.A. GALLARDO-HERNÁNDEZ. Rolling–sliding laboratory tests of friction modifiers in dry and wet wheel–rail contacts. Wear. 2010, 268(3-4), 543-551. DOI: 10.1016/j.wear.2009.09.015. ISSN 00431648.

LI, Z., O. ARIAS-CUEVAS, R. LEWIS a E. A. GALLARDO-HERNÁNDEZ. Rolling–Sliding Laboratory Tests of Friction Modifiers in Leaf Contaminated Wheel–Rail Contacts. Tribology Letters. 2009, 33(2), 97-109. DOI: 10.1007/s11249-008-9393-3. ISSN 1023-8883.

GALAS, R., M. OMASTA, I. KRUPKA a M. HARTL. Laboratory investigation of ability of oil-based friction modifiers to control adhesion at wheel-rail interface. Tribology Letters. 2009, 33(2), 97-109. DOI: 10.1016/j.wear.2016.09.015.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

ABSTRAKT

Aplikaci modifikátoru tření lze efektivně řídit adhezi v kontaktu kola a kolejnice. Řízením adheze lze následně redukovat nadměrné opotřebení kontaktních těles nebo zvýšenou hladinu hluku. Podstatou této diplomové práce je stanovit optimální množství modifikátoru tření v kontaktu kola a kolejnice v závislosti na okolních podmínkách a provozních parametrech. Pro experimentální studium chování modifikátoru tření studium je využito dvoudiskové zařízení simulující nejvýznamnější provozní parametry, kterými jsou rychlost, skluz, úhel náběhu kola do traťového oblouku nebo kontaktní tlak. Na základě těchto poznatků byl navržen řídicí systém off-board aplikační jednotky, který řídí dávkování modifikátoru tření podle aktuálních okolních podmínek a provozních parametrů.

ABSTRACT

The adhesion in the wheel-rail contact can be effectively controlled by using the friction modifier. Adhesion control can reduce excessive wear of the contact bodies or noise. The essence of this diploma thesis is to determine the optimal amount of friction modifier in wheel-rail contact depending on the climatic and operating conditions. For experimental study of the behavior of the friction modifier, the twin-disc device is used. Twin-disc simulates and controls the most important operating parameters such as speed, slip, attack angle or contact pressure. On the basis of these findings, the off-board top-of-rail lubricator system was designed. This system controls the amount of friction modifier according to current climatic and operating conditions.

KLÍČOVÁ SLOVA

součinitel adheze, modifikátor tření, tribologie kontaktu kola a kolejnice, kontakt kola a kolejnice, top-of-rail

KEYWORDS

adhesion coefficient, friction modifier, wheel-rail tribology, wheel-rail contact, top-of-rail

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KNÁPEK, J. *Experimentální studium modifikátorů tření v kolejové dopravě*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 86 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Radovan Galas.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem práci *Experimentální studium modifikátorů tření v kolejové dopravě* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Radovana Galase a uvedl veškeré použité zdroje.

V Brně dne 19. května 2017

.....
Jiří Knápek

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Radovanu Galasovi za odborné vedení a cenné rady při tvorbě této diplomové práce. Velký dík patří také mé rodině za podporu během celého studia.

OBSAH

OBSAH	11
ÚVOD	13
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
1.1 Adheze v kontaktu kola a kolejnice – vymezení základních pojmů	14
1.1.1 Adheze v kolejové dopravě	14
1.1.2 Třecí vrstva mezi tělesy	17
1.2 Experimentální přístup	19
1.3 Parametry ovlivňující adhezi v kontaktu kola a kolejnice	21
1.3.1 Vliv provozních parametrů	22
1.3.2 Predikce adheze na základě provozních parametrů	24
1.3.3 Vliv okolních podmínek	25
1.4 Friction management	28
1.4.1 Způsoby řízení adheze v kontaktu	28
1.4.2 Řídící systémy TOR jednotek	28
1.4.3 Charakteristika modifikátoru tření	29
1.4.4 Experimentální studium modifikátoru tření v kolejové dopravě	30
2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	35
2.1 Shrnutí poznatků z kritické rešerše	35
2.2 Analýza problému	36
2.3 Podstata a cíl diplomové práce	36
2.4 Výstupy práce	37
2.5 Odůvodnění nutnosti a potřeby řešení	37
3 MATERIÁL A METODY	38
3.1 Experimentální zařízení	39
3.1.1 Dvoudiskové zařízení	39
3.1.2 Podmínky experimentu a nastavení experimentálního zařízení	41
3.1.3 Hlukoměr	43
3.2 Materiály	44
3.2.1 Kontaktní tělesa	44
3.2.2 Modifikátor tření	45
3.2.3 Kontaminační materiál	46
3.3 Průběh experimentů	47
3.3.1 Průběh verifikačních experimentů	47
3.3.2 Průběh experimentů s modifikátorem	47
3.3.3 Vyhodnocení experimentů	49
4 VÝSLEDKY	51
4.1 Návrh řízení off-board jednotky	51
4.2 Verifikační experimenty	53
4.2.1 Vliv částic opotřebení na výsledky experimentů	53
4.2.2 Určení skutečného množství modifikátoru tření v kontaktu	54
4.2.3 Verifikační experimenty	54
4.2.4 Porovnání experimentálně získaných dat s predikčními vztahy	56
4.3 Experimenty vlivu modifikátoru tření	57
4.4 Hluková emise	63
4.5 Návrh výpočtového modelu aplikovaného množství modifikátoru tření	64
4.4.4 Výpočtový model množství modifikátoru tření	64
4.4.5 Porovnání výpočtového modelu s experimentem	66

5 DISKUSE	68
5.1 Parametry experimentálního zařízení a jejich vliv na výsledky	68
5.2 Zhodnocení experimentální části	69
5.2.1 Experimenty vlivu provozních parametrů na modifikovaný kontakt	69
5.2.2 Vliv kontaminantů tratě na modifikovaný kontakt	69
5.2.3 Srovnání komerčních modifikátorů	70
5.3 Zhodnocení navrženého řídicího systému	71
6 ZÁVĚR	73
7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	74
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	80
9 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	82
10 SEZNAM TABULEK	84
11 SEZNAM PŘÍLOH	85

ÚVOD

S rychlostí, jakou se dnes vyvíjí automobilová a nákladní doprava roste i její podíl v celkovém objemu přepravovaných osob a nákladu. Ačkoliv má osobní a nákladní automobilová doprava své nesporné výhody, přináší s sebou také výrazné negativní jevy jako je např. nadměrné znečištění životního prostředí nebo hluková emise a tím pádem i snížení kvality života obyvatelstva. Jedním ze způsobů redukce problémů spojených se silniční dopravou je větší zapojení železniční dopravy, jejíž síť je ve střední Evropě poměrně hustá. V hustotě železniční sítě zaujímá Česká republika dokonce evropské prvenství [28]. K udržení efektivnosti, atraktivnosti a konkurenceschopnosti železniční dopravy je nutné tuto oblast stále rozvíjet a potlačovat negativní jevy, které jsou s ní spojené. Kromě požadavků na dobu a přepravované množství materiálu jsou kladeny také požadavky komfort a bezpečnost, a to zejména v osobní dopravě.

Jedním z faktorů kolejové dopravy, mající vliv na všechny zmiňované požadavky, je přímý kontakt kola a kolejnice. Provoz kolejových vozidel je doprovázen řadou negativních jevů plynoucích z nejrůznějších mechanismů chování přímo v kontaktu kola a kolejnice. Mezi tyto negativní jevy lze zařadit např. zvýšenou hladinu hlukové emise, což je nežádoucí zejména v rezidenčních oblastech a historických centrech měst a obcí. Dalšími negativními jevy jsou prodloužení brzdné dráhy a ztráta adheze z důvodu kontaminace trati běžnými kontaminanty. V neposlední řadě se jedná o výrazné opotřebení kol a kolejnic, z čehož plynou i značné finanční ztráty. Jednoduše řečeno, příčinou většiny uvedených negativních jevů je pro dané provozní podmínky buď příliš nízká nebo vysoká adheze. Z toho důvodu je na studium kontaktu kola a kolejnice celosvětově vynakládáno mnoho úsilí a prostředků. Snahou ovšem není jen porozumět faktorům, které mají vliv na adhezi v kontaktu kola a kolejnice, ale také tuto adhezi cíleně řídit a modifikovat, a to za chodu kolejového vozidla. K tomuto účelu slouží aplikační jednotky umístěné stacionárně na trati nebo přímo na kolejovém vozidle. Tyto jednotky využívají k řízení adheze v kontaktu tzv. modifikátory tření. Aplikační jednotky existují v pasivní a aktivní formě, přičemž v dnešní době hojně se vyskytující pasivní jednotky aplikují předem stanovené fixní množství modifikátoru bez ohledu na provozní a okolní podmínky. Z toho důvodu dochází pro některé kontaktní podmínky k nanesení příliš velkého nebo nedostatečného množství modifikátoru tření. Klíčem k mnohem přesnějšímu řízení adheze jsou aktivní aplikační jednotky, které v reálném čase monitorují aktuální provozní a okolní podmínky, na základě kterých vyhodnotí aktuální kontaktní parametry a potřebné množství modifikátoru tření. Výskyt těchto jednotek je v kolejové dopravě méně častý a velkou část vývoje mají stále před sebou.

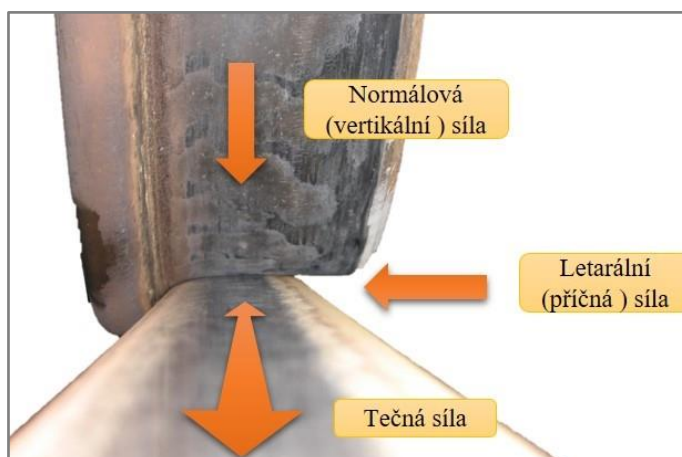
Aby byla zajištěna správná funkce modifikátoru tření, je nutné pochopit jeho chování za daných provozních podmínek a v daném aplikovaném množství, což je také předmětem studia této diplomové práce, a to společně s návrhem schématu řídicího systému reálné aktivní aplikační jednotky, která je v rámci projektu TAČR vyvíjena.

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

1.1 Adheze v kontaktu kola a kolejnice – vymezení základních pojmů

1.1.1 Adheze v kolejové dopravě

Vzájemnou interakci styčných povrchů kola kolejového vozidla a kolejnice dochází v kontaktu k přenosu tří základních sil. Jak je vidět na obr.1, jedná se o sílu normálovou (vertikální), tečnou (trakční) a laterální (příčnou). Schopnost kontaktu přenášet mezi kontaktními tělesy tečnou sílu se nazývá adheze. Jelikož má adheze přímý vliv na akceleraci a deceleraci vozidla a tím pádem i na celkovou bezpečnost, dochvilnost a opotřebení, jedná se o klíčovou vlastnost valivě-skluzového kontaktu kola a kolejnice. Ke stanovení míry adheze v takovémto kontaktu se používá tzv. *součinitel adheze*, který je definován dle vztahu (1) jako podíl tečné síly přenášené kontaktem a normálové síly. Hodnota součinitele adheze se pohybuje v intervalu $(0, f_0)$, kde f_0 představuje součinitel smykového tření definující tření v čistě skluzovém kontaktu. [2]



Obr. 1 Síly v kontaktu kola a kolejnice [5]

$$\mu = \frac{T}{Q} \quad (1)$$

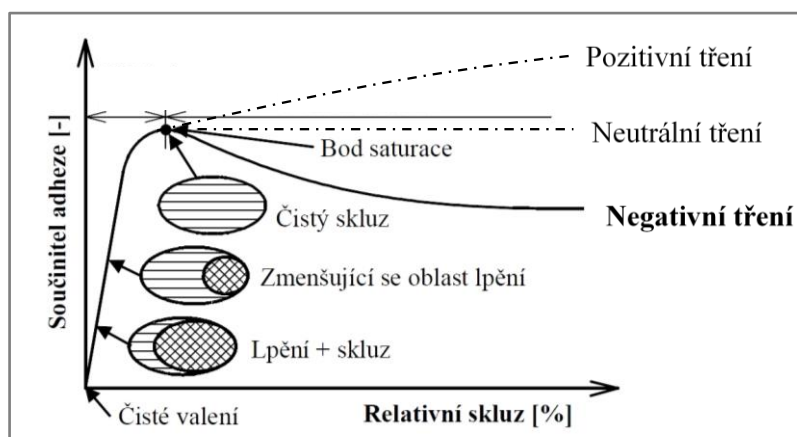
kde:

μ		součinitel adheze
T	[N]	tečná síla
Q	[N]	normálová síla

Kontaktní oblast mezi kónickou plochou obvodu kola a projížděnou plochou kolejnice má eliptický charakter, a to s hlavní osou umístěnou podélně se směrem valení. Velikost této oblasti se pohybuje běžně okolo 1-2 cm². Kontaktní tlak mezi styčnými tělesy se vyjadřuje nejčastěji dle Hertzovi teorie.

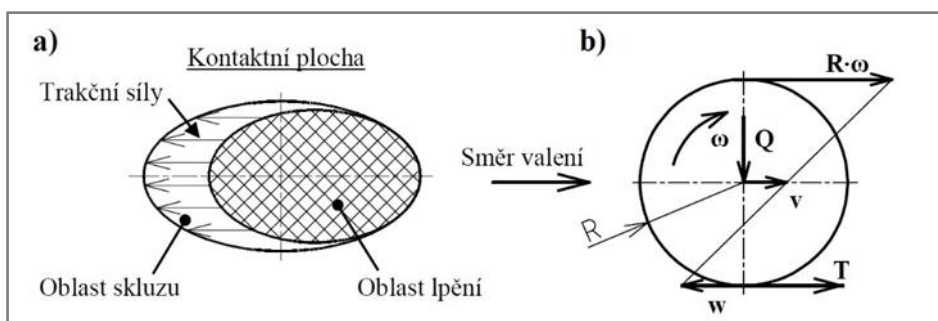
Jak lze pozorovat na obr. 2, kontaktní plocha se během odvalování skládá z oblasti lpění (*stick*) a oblasti skluzu (*slip*), která v kontaktu přenáší trakční síly.

Takovýto kontakt se nazývá valivě-skluzový. Adheze v tomto kontaktu roste s rostoucím podílem oblasti skluzu v kontaktní ploše. Trakční křivku lze rozdělit dle trendu na křivku s negativním, neutrálním a pozitivním třením. Jakmile na trakční křivce dosáhne adheze bodu saturace (v případě negativního tření), je potlačena oblast lpění a celou kontaktní plochu tvoří oblast skluzu. Jedná se tedy o bod, ve kterém se z valivě skluzového kontaktu stává na okamžik čistě skluzový kontakt a dochází tak k prokluzu kola. Za suchých a čistých kontaktních podmínek se bod saturace kontaktu kola a kolejnice pohybuje běžně okolo 1-2 % relativního skluzu. V oblasti za bodem saturace dochází již k čistému skluzu, což přináší zvýšené opotřebení styčných povrchů. Trakční křivku negativního tření tedy lze z provozního hlediska rozdělit na dvě základní části efektivní oblast před bodem saturace a neefektivní oblast za bodem saturace. [1,2]



Obr. 2 Trakční křivka a složení kontaktní plochy – upraveno podle [3]

Relativní skluz charakterizuje vzájemný skluz po sobě se odvalujících povrchů. Je dán vztahem (3) jako podíl skluzové rychlosti w (2) a dopředné rychlosti vozidla v (obr. 3). Relativní skluz se většinou vyjadřuje v procentech. Skluzová rychlost je v tomto vztahu definována jako rozdíl obvodové a dopředné rychlosti kola, přičemž udává vzájemnou rychlost pohybu kontaktních povrchů. [1]



Obr. 3 a) kontaktní plocha, b) rychlosti a síly působící na kolo při jeho odvalování [3]

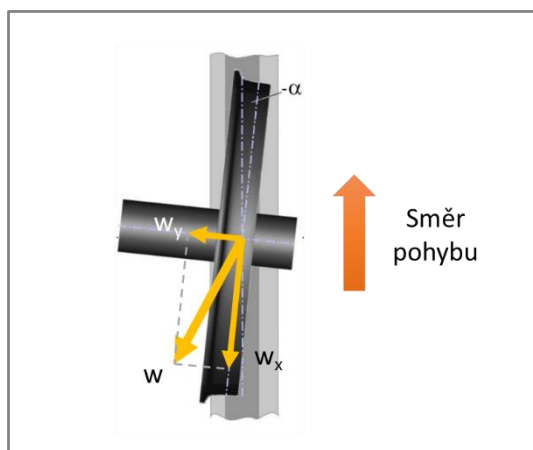
$$w = R\omega - v \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{R\omega - v}{v} \cdot 100 \quad (3)$$

kde:

v	[m/s]	dopředná rychlost vozidla
w	[m/s]	skluzová rychlost
R	[m]	poloměr kola
ω	[rad/s]	úhlová rychlost
γ	[%]	relativní skluz

V případě průjezdu kolejového vozidla traťovým obloukem přibývá složka relativního skluzu a skluzové rychlosti i v příčném směru (obr. 4). Celkový relativní skluz a skluzová rychlost lze v tomto případě vyjádřit vztahy (4-7). [47]



Obr. 4 Skluzové rychlosti na kole pohybujícím se v traťovém oblouku, upraveno podle [30]

$$w = \sqrt{(R\omega - v \cos \alpha)^2 + (v \sin \alpha)^2} \quad (4)$$

$$\gamma_x = \frac{R\omega - v \cos \alpha}{v} 100; \gamma_y = \frac{v \sin \alpha}{v} 100 \quad (5,6)$$

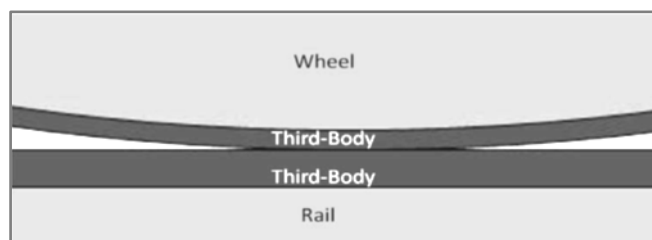
$$\xi = \sqrt{\gamma_x^2 + \gamma_y^2} \quad (7)$$

kde:

v	[m/s]	dopředná rychlost vozidla
w	[m/s]	skluzová rychlost
ω	[rad/s]	úhlová rychlost
R	[m]	poloměr kola
γ	[%]	relativní skluz
γ_x	[%]	složka relativního skluzu v tečném směru
γ_y	[%]	složka relativního skluzu v příčném směru

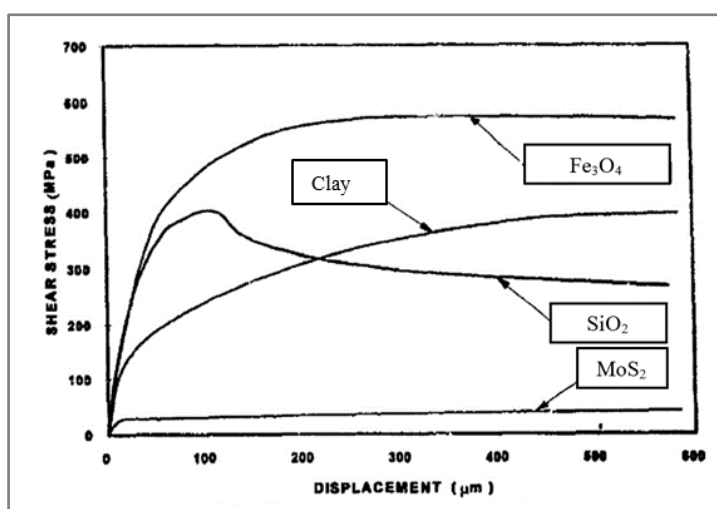
1.1.2 Třecí vrstva mezi tělesy

Při detailním zkoumání kontaktu kola a kolejnice bylo zjištěno, že k interakci kontaktními povrchy nedochází přímo, ale prostřednictvím třecí vrstvy (obr. 5). Tato vrstva je v odborné literatuře běžně označována jako tzv. *third body*. Jedná se o směs nejrůznějších produktů oxidace, částic uvolněných z kontaktních těles v podobě otěru, ale také směs vnějších látek a kontaminantů jako jsou modifikátor tření, částice vody, oleje, písku, listí atd. Třecí vrstva má přímý vliv na adhezní vlastnosti kontaktu, přičemž mezi její nejvýznamnější vlastnosti patří tloušťka, složení a smyková pevnost.



Obr. 5 Třecí vrstva [2]

Jednou z prvních studií zabývajících se tvorbou třecí vrstvy byla publikace [6]. V této práci popsal Hou proces utváření třecí vrstvy. Byl zde také popsán experiment na pin-on-disk reometru, kdy bylo pozorováno chování v kontaktu po přidání oxidu železnatoželezitého, sulfidu molybdeničitého a oxidu křemičitého. Z výsledků publikace vyplývá, že vlivem vzájemného tření styčných těles dochází k oddělení povrchových nerovností. Vlivem vysokého tlaku a teploty v kontaktu dochází k oxidaci tohoto otěru. Jeho část je z kontaktu vytlačena a ta zbývající se dále podílí na oxidaci a uvolňování nového otěru. Tento proces má za následek úplné oddělení třecích povrchů dostatečně silnou třecí vrstvou vznikající mezi nimi. S rostoucí tloušťkou vrstvy dochází k poklesu její tuhosti a po překročení její smykové pevnosti dojde k uvolnění této vrstvy ve formě vloček. Celý proces se poté opakuje. Z výsledku na obr. 6 je dále patrné, že některé látky jsou schopné nejen měnit hodnotu adheze v kontaktu, ale také změnit tvar trakční křivky, popř. potlačit bod saturace.

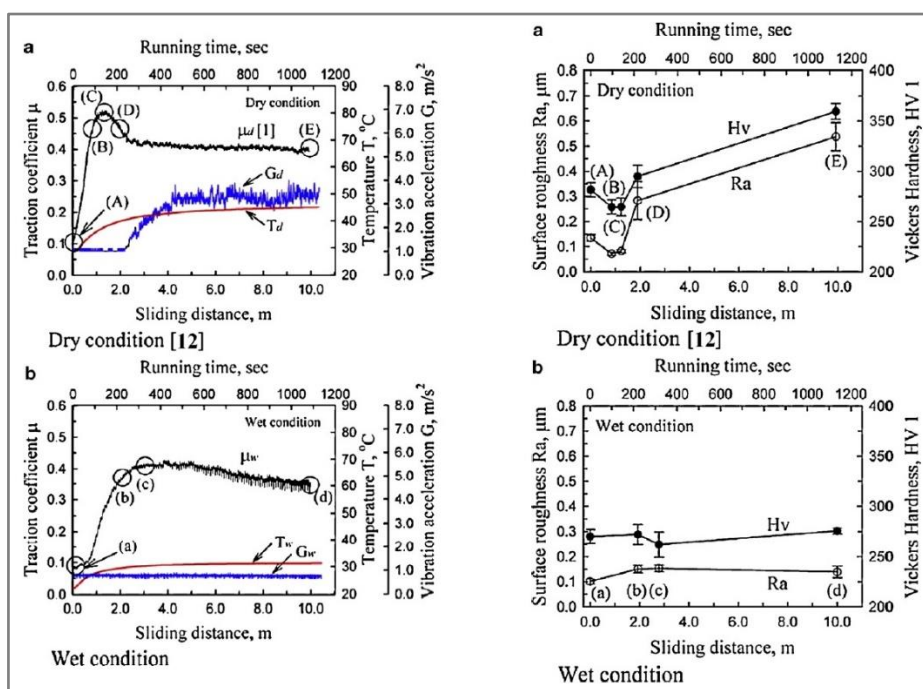


Obr. 6 Vliv sloučenin na smykové napětí třecí vrstvy [6]

Třecí vrstvou a speciálně jejím složením se zabývaly publikace [7,8]. Nakahara, Baek a kol. v těchto studiích pozorovali tvorbu oxidických sloučenin v průběhu experimentu a jejich vliv na adhezi. Experimenty byly provedeny na dvoudiskovém zařízení, a to jak pro suchý, tak vodou kontaminovaný kontakt. Oba experimenty byly provedeny za podmínek: kontaktní tlak 800 MPa, rychlost 1,26 m/s, relativní skluz 0,7 %, teplota 30°C a relativní vlhkost 60% (pro suchý kontakt), teplota vody pro kontaminovaný kontakt 18-22 °C. Ke studiu materiálu povrchů a třecí vrstvy byla využita metoda Augerovi elektronové a Ramanovi laserové spektroskopie. Kromě složení a vlivu třecí vrstvy byly pozorovány i změny tvrdosti a drsnosti v průběhu experimentů.

Výsledky experimentu za suchých podmínek (obr. 7) ukázaly v první fázi (A-B) prudký nárůst adheze doprovázený poklesem drsnosti a tvrdosti. V oblasti mezi body A-B byl zaznamenán prudký nárůst koncentrace tvrdého oxidu železitého, čemuž je připisován onen prudký nárůst adheze. Mezi body B-C dochází k nárůstu koncentrace měkkého oxidu železnato-železitého, což postupně zabraňuje další tvorbě oxidu železitého. Za bodem C již dochází pouze k tvorbě oxidu železnato-železitého, k prudkému nárůstu tloušťky třecí vrstvy a také poklesu adheze.

U vodou kontaminovaného kontaktu byl prvotní nárůst adheze mezi body A a B přisuzován tvorbě a zvyšování koncentrace tvrdého oxidu železitého v třecí vrstvě. Za bodem B následovalo zvyšování koncentrace měkkého oxidu železnato-železitého, což stejně jako v předchozím případě přineslo postupný pokles adheze v kontaktu. Dalším z důležitých výsledků je, že s přítomností vody v kontaktu nedocházelo k výraznějším změnám tvrdosti a drsnosti povrchů stykových těles.



Obr. 7 Výsledky experimentů za suchého a vodou kontaminovaného kontaktu [8]

Poměrně rozsáhlou studii věnoval tvorbě třecí vrstvy také Lewis [43]. Ten ve své práci simuloval interakci komerčního modifikátoru na vodní bázi s různými oxidy a povrchy kontaktních těles. Veškeré experimenty navíc simuloval pro různé klimatické podmínky, tzn. různou teplotu a relativní vlhkost. K tomuto účelu sloužilo pin-on-disc

zařízení vybavené klimatickou komorou. Zařízení bylo po celou dobu nastaveno na kontaktní tlak 900 MPa a rychlost 0,01 m/s. Pro simulaci nejběžnějších třecích produktů byl modifikátor smíchán v různých koncentracích s oxidem železitým (Fe_2O_3) a oxidem železnato-železitým (Fe_3O_4). Tyto koncentrace byly navíc nakombinovány s různými teplotami a relativními vlhkostmi během experimentu. Tím bylo vytvořeno velké množství variant klimatických a kontaktních podmínek. Teplota se pohybovala v rozmezí 10-20 °C, relativní vlhkost 40-90 % a koncentrace vybraných oxidů v modifikátoru 25-43 %.

Detailní výsledky jednotlivých měření lze pozorovat přímo v Lewisově publikaci. Obecným závěrem této práce je, že kontakt kola a kolejnice probíhá téměř výhradně prostřednictvím třecí vrstvy a její složení přímo ovlivňuje adhezi v kontaktu. Adheze během jednotlivých experimentů se pohybovala v poměrně širokém rozmezí 0,15-0,75, a to i přes to, že kontaktní podmínky, jako je rychlost, skluz, zatížení a množství modifikátoru, byly stejné pro všechny experimenty. Různé klimatické podmínky tedy vedou k různým formám a stupňům oxidace tratí. Z toho důvodu nelze po aplikaci stejného množství modifikátoru a za stejných provozních parametrů na různých tratích dosáhnout totožných výsledků adheze.

1.2 Experimentální přístup

1.2

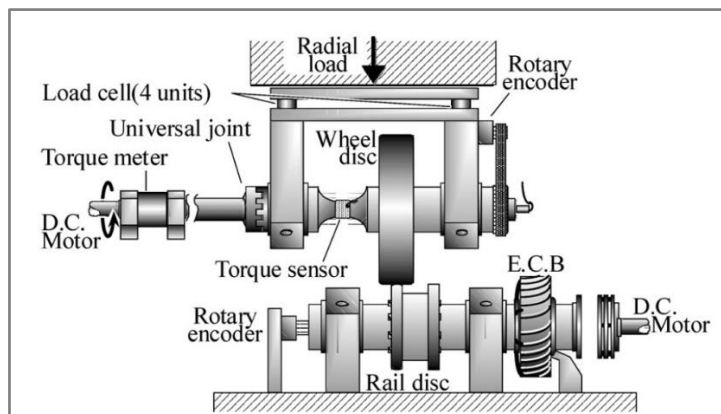
V souvislosti se studiem kontaktu kola a kolejnice je využívána řada metod a zařízení, přičemž použití kteréhokoli z nich má své konkrétní opodstatnění. Studium kontaktu může probíhat jak na laboratorních experimentálních zařízeních, tak i na reálných tratích. Měření na reálné trati je někdy až extrémně časově náročné, nákladné a oproti laboratorním podmínkám nenabízí tak detailní nastavení kontaktních podmínek, jako je tomu možné u níže uvedených zařízení. Na druhou stranu nespornou výhodou studia na trati jsou reálné kontaktní a provozní podmínky, čemuž odpovídají i reálné a nezkreslené výsledky.

Ke studiu kontaktu kola a kolejnice se v laboratorních podmínkách využívají dvě skupiny zařízení, a to komerčně dostupná zařízení sloužící k obecnému studiu kontaktu a zařízení navržená speciálně k simulaci a studiu kontaktu kola a kolejnice. Mezi komerční zařízení k obecnému studiu kontaktu se řadí *pin-on-disk reometr* a *mini traction machine* (dále jen MTM). Mezi zařízení sloužící k simulaci kola a kolejnice se řadí dvoudiskové zařízení s měřítkovým zkreslením a tzv. *full scale* zařízení s kontaktními tělesy v reálné velikosti. Výhodou některých laboratorních zařízení oproti studiu na reálné trati je možnost nastavení kontaktních a provozních podmínek jako jsou kontaktní tlak, rychlost, relativní skluz, teplota, geometrie kontaktních těles atd.

Dvoudiskové zařízení (*twin-disc*)

Jedná se o dvoudiskové a nejběžněji používané zařízení pro simulaci kontaktu kola a kolejnice, přičemž disk simulující kolo je vyroben ve zmenšeném měřítku oproti skutečnému kolu. Jeho schéma lze pozorovat na obr. 8. Oba disky jsou řízeny nezávisle na sobě, což umožňuje nastavení požadované skluzové rychlosti a relativního skluзу. Dle geometrie disků je toto zařízení schopno simulovat jak liniový, tak bodový kontakt. Disky jsou k sobě přitlačovány danou silou tak, aby mezi nimi byl simulován reálný kontaktní tlak. Některá dvoudisková zařízení jsou natočením jednoho z disků

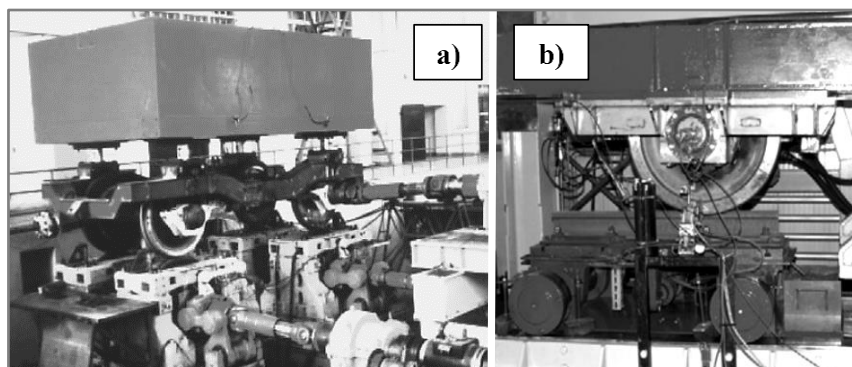
schopna simulovat i úhel náběhu kola do traťového oblouku. Výstupem tohoto zařízení je průběh součinitele adheze. Rychlostní limity dvoudiskových zařízení se odvíjí od jejich konstrukce. Ve většině případů se maximální dosažitelné rychlosti pohybují hluboko pod 100 km/h.



Obr. 8 Schéma dvoudiskového zařízení [4]

Zařízení v životní velikosti (*full scale rig*)

Jedná se o zařízení s reálným kolem v reálné velikosti, popř. diskem o velikosti reálného kola. Naproti tomuto kolu může být stejně jako u dvoudiskového zařízení umístěný buď druhý disk (tzv. *full scale rig* zařízení), nebo reálná kolejnice (tzv. *wheel on rail* zařízení - obr. 9b), přičemž skluz mezi kolem a kolejnicí je vyvozen posuvným pohybem kolejnice. Full scale rig se využívá buď ve formě konstrukce s dvěma disky nebo ve formě skutečného podvozku kolejového vozidla, který je speciálně upravený pro laboratorní podmínky (obr. 9a). Tato varianta je ovšem extrémně finančně náročná. Výstupem obou zařízení je stejně jako u předchozího dvoudiskového zařízení průběh součinitele adheze. Výhodou tohoto zařízení je možnost simulace vysokých rychlostí, a to běžně nad 100 km/h (v některých případech dokonce až 280 km/h [9]).

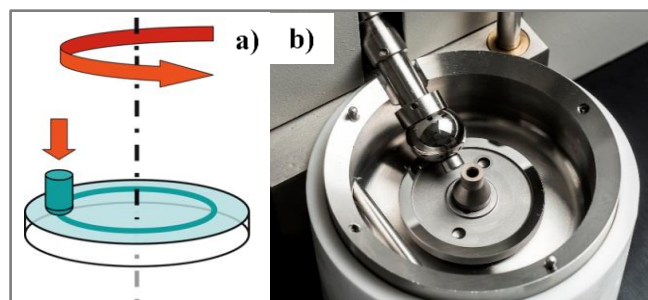


Obr. 9 a) Full scale rig [9], b) wheel on rail [10]

Mini traction machine (MTM) a pin on disc reometr

Jedná se o menší laboratorní zařízení ke studiu adheze v kontaktu s výborně kontrolovatelnými parametry jako jsou skluzová rychlost, relativní skluz a zatížení. Jejich hlavní nevýhodou je zejména velké měřítkové zkreslení. V případě pin on disc reometru (schéma na obr. 10a) se jedná o zařízení simulující pouze čistý skluz při různých rychlostech a zatíženích, což může vést k významnému ovlivnění

experimentu narůstající teplotou v kontaktu. V souvislosti s kontaktem kola a kolejničky se pin on disc reometr využívá zejména ke studiu třecí vrstvy a třecích produktů vznikajících v tomto kontaktu. Zařízení MTM (obr. 10b) je vhodné ke studiu vlivu nejrůznějších kontaminantů a modifikátorů tření na adhezi ve valivě-skluzovém kontaktu. Kontaktními tělesy jsou v tomto případě kulička odvalující se po disku. Jak bylo ale dokázáno Galasem [11], u malého MTM zařízení je velmi obtížné za suchých podmínek simulovat bod saturace. Z toho důvodu není toto zařízení vhodné pro pozorování schopnosti modifikátorů tření modifikovat trend trakční křivky a negativní jevy vyskytující se za bodem saturace.



Obr. 10 a) Pin on disc reometr [13], b) MTM [12]

1.3 Parametry ovlivňující adhezi v kontaktu kola a kolejničky

1.3

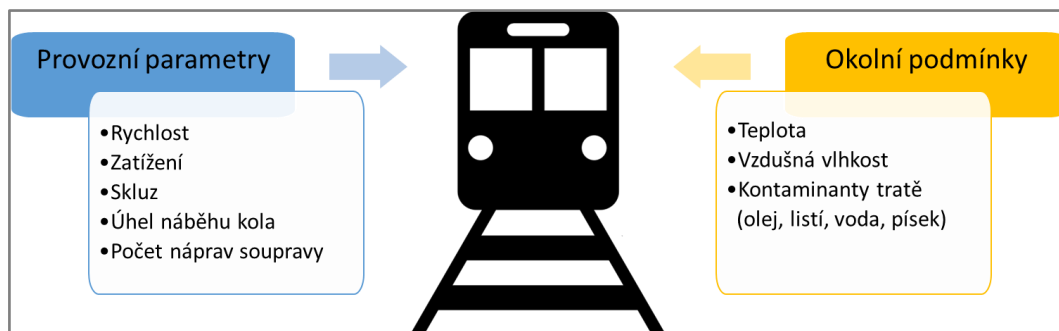
V souvislosti s provozem reálného kolejového vozidla existuje celá řada parametrů ovlivňujících adhezi v kontaktu kola a kolejničky. Z toho důvodu mají tyto parametry také přímý vliv na schopnost akcelerace, brzdnu dráhu vozidla, bezpečnost, míru hlukové emise v kontaktu a v neposlední řadě na nejrůznější mechanismy opotřebení plynoucí z nevhodné míry adheze pro dané konkrétní podmínky.

V tab. 1 je uveden přehled hodnot součinitele adheze vhodných pro jednotlivé fáze provozu kolejového vozidla.

Tab. 1 Hodnoty součinitele adheze vhodné pro provoz kolejového vozidla [31]

Dostatečná hodnota adheze pro brždění	$0,14 < \mu$
Hodnota adheze vhodná pro trakci	$0,1 < \mu < 0,3$
Nízká adheze	$0,05 < \mu < 0,1$
Extrémně nízká adheze	$\mu < 0,05$

Parametry ovlivňující adhezi v kontaktu kola a kolejničky lze obecně rozdělit na provozní parametry a okolní podmínky (obr. 11). K provozním parametrům se řadí rychlost vozidla, úhel náběhu kola do traťového oblouku, zatížení, ale např. i délka kolejové soupravy. S rostoucí délkou soupravy a počtem náprav roste teplota v daném místě kolejničky, což je také jedním z důležitých parametrů mající vliv na chování kontaktu. Mezi okolní podmínky patří okolní teplota, vlhkost a kontaminanty tratě. Z nejběžnějších a nejvýraznějších kontaminantů tratě to jsou hlavně voda, olej, písek a listí, ze kterého je pod tlakem vylučován pektin, který způsobuje extrémně nízkou adhezi.

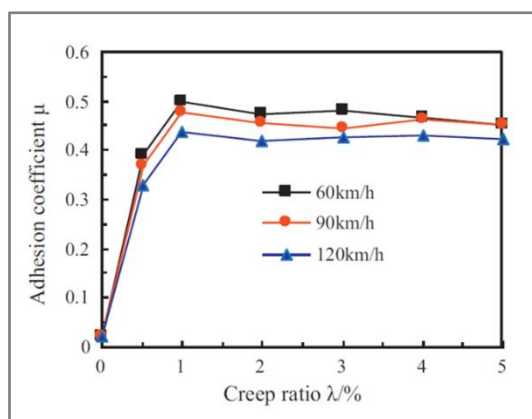


Obr. 11 Parametry ovlivňující adhezi v kontaktu

1.3.1 Vliv provozních parametrů

Vliv rychlosti

Vlivem rychlosti na adhezi v kontaktu se ve svých publikacích zabývali autoři Wang [14], Zhang [9], Baek [7,16]. Wang [14] ve svém experimentu simuloval na dvoudiskovém zařízení rychlosti postupně od 16 m/s do 33 m/s, přičemž u suchého kontaktu zaznamenal pokles součinitele adheze v rozmezí 0,5-0,4 (obr. 12). Stejný trend Wang zaznamenal i u vodou kontaminovaného kontaktu. Podobných výsledků dosáhl i Zhang. Na experimentálním zařízení v životní velikosti zaznamenal při zvýšení rychlosti z 2,7 m/s na 16,6 m/s pokles adheze z 0,6 na 0,5 (v suchém kontaktu při skluzu 8 %). Pokles adheze při rostoucí rychlosti byl zaznamenán opět i ve vodou kontaminovaném kontaktu. Baek ve své práci studoval vliv rychlosti v rozmezí 0,31-5,03 m/s, a to jak za suchých, tak vodou kontaminovaných podmínek. Z výsledků jeho experimentů vyplývá pokles adheze při navýšení rychlosti za suchých i kontaminovaných podmínek. Všichni autoři se shodují, že rychlost výrazně ovlivňuje adhezi v kontaktu a to tak, že s rostoucí rychlostí adheze klesá.



Obr. 12 Vliv rychlosti na součinitel adheze [14]

Vliv zatížení

Vlivem zatížení na adhezi v kontaktu se ve svých publikacích zabývali autoři Wang [14], Zhang [9], Baek [7,16]. Wang ve svém experimentu postupně navyšoval kontaktní tlak z 1050 MPa až na 1194 MPa. Během této změny byl u suchého kontaktu zaznamenán pokles součinitele adheze přibližně o $\Delta\mu=0,1$. Wang také studoval vliv zatížení u olejem kontaminovaného kontaktu, kde byl zaznamenán přesně opačný

trend. Změna součinitele adheze u kontaminovaného kontaktu byla však nepatrná ($\Delta\mu=0,01$). Osově zatížení na nápravu bylo v Zhangově studiu simulováno v rozmezí 67-135 kN. Během tohoto vzrůstu zatížení došlo u suchého kontaktu k nepatrnému poklesu adheze v rozmezí $\Delta\mu=0,01$ (obr. 13). Baek ve svém experimentu simuloval na dvoudiskovém zařízení kontaktní tlak od 640 MPa až po 1000 MPa. Při zvýšení zatížení z 640 MPa na 1000 MPa vzrostla hodnota součinitele adheze o méně než 0,08. Ačkoliv byl v tomto případě zaznamenán přesně opačný trend než v publikacích předešlých autorů, byla opět potvrzena teorie, že adheze není příliš citlivá na změny zatížení.

Speed (km/h)	Axle-load (kN)			
	67	88	110	135
100	0.0445	0.0423	0.0406	0.0387
140	0.0455	0.0406	0.0392	0.0373
180	0.0489	0.0494	0.0402	0.0393

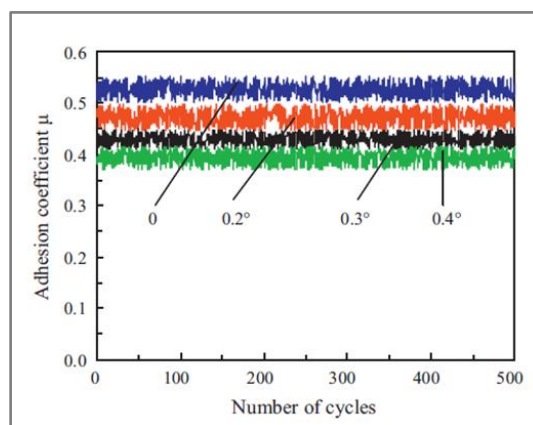
Obr. 13 Výsledky Zhangova experimentu [9]

Vliv skluzu

Vliv skluzu byl sledován v publikacích [7, 9, 14, 16]. Ačkoliv byly v těchto pracích primárně sledovány parametry, jako jsou zatížení, rychlost nebo úhel náběhu, lze na výsledcích pozorovat i vliv samotného skluzu. Byly zde sestaveny typické trakční křivky s pozitivním nebo negativním trendem tak, jak je popsáno v kapitole 1.1.1. Z výsledků experimentů v těchto publikacích je zřejmé, že skluz má ze všech uvedených provozních parametrů nejvýraznější vliv.

Vliv úhlu náběhu kola

Vlivem úhlu náběhu kola do traťového oblouku na adhezi v kontaktu se zabýval Wang [14]. Wang simuloval úhel náběhu v rozmezí 0° - $0,4^\circ$. Z výsledků těchto experimentů je patrné, že s rostoucím úhlem náběhu klesá hodnota součinitele adheze v tečném směru (obr. X). Při vzrůstu úhlu náběhu v uvedeném rozmezí zaznamenal Wang pokles součinitele adheze v rozmezí přibližně 0,55-0,4 (obr. 14).



Obr. 14 Vliv úhlu náběhu kola [14]

1.3.2 Predikce adheze na základě provozních parametrů

Na základě experimentů byla stanovena i celá řada vztahů predikujících hodnotu součinitele adheze v závislosti na některých provozních parametrech. Nejčastěji využívané vztahy lze pozorovat níže.

Fingberg/Kraft [34]

Kraft popsal závislost součinitele adheze na skluzové rychlosti následujícím způsobem (8). Bylo prokázáno, že Kraftův vztah není vhodný a příliš přesný pro nižší rychlosti. Pro rychlosti do 1 m/s byl tento vztah modifikován Fingerbergem ve formě vztahu (10). Kraft také uvedl vztah pro výpočet statického součinitele smykového tření (11).

$$\mu_0(\gamma) = \mu_{stat} \left(1 - 0,5e^{\frac{-0,138}{|w|}} - 0,5e^{\frac{-6,9}{|w|}} \right) \quad (8)$$

$$w = \gamma v \quad (9)$$

$$\mu_0(\gamma) = \mu_{stat} \left(\frac{50}{100 + w^2} + \frac{0,1}{0,2 + |w|} \right) \quad (10)$$

$$\mu_{stat} = \left(\frac{\tau_w \tau_R}{\tau_w + \tau_R} \right) \frac{\pi ab}{N} \quad (11)$$

Kde:

μ_0	[-]	Součinitel adheze
μ_{stat}	[-]	Statický součinitel smykového tření
γ	[-]	Skluz
v	[m/s]	Dopředná rychlost
w	[m/s]	Skluzová rychlost
τ_w	[Pa]	Smyková pevnost materiálu kola
τ_R	[Pa]	Smyková pevnost materiálu kolejničky
a	[m]	Hlavní poloosa eliptické kontaktní oblasti
b	[m]	Vedlejší poloosa eliptické kontaktní oblasti
N	[N]	Normálová zátěžná síla

Poiré/Bochet [34]

Poiré a Bochet stanovili závislost součinitele adheze na rychlosti vztahem (12), přičemž hodnotu μ_{stat} pro velmi suchou kolejnici uvažovali 0,31, pro suchou kolejnici 0,22 a pro mokrou kolejnici 0,14.

$$\mu_0(\gamma) = \mu_{stat} \left(\frac{1}{1 + 0,03|w|} \right) \quad (12)$$

$$w = \gamma v \quad (13)$$

Kde:

μ_{stat}	[-]	Statický součinitel smykového tření
--------------	-----	-------------------------------------

γ	[-]	Skluz
v	[m/s]	Dopředná rychlost
w	[m/s]	Skluzová rychlost

Galton [34]

Galton stanovil závislost součinitele adheze na rychlosti vztahem (14), přičemž hodnotu μ_{stat} pro suchou kolejnici uvažovali 0,45 a pro vlhkou kolejnici 0,25.

$$\mu_0(\gamma) = \mu_{stat} \left(\frac{1 + 0,018|w|}{1 + 0,097|w|} \right) \quad (14)$$

$$w = \gamma v \quad (15)$$

Kde:

μ_{stat}	[-]	Statický součinitel smykového tření
γ	[-]	Skluz
v	[m/s]	Dopředná rychlost
w	[m/s]	Skluzová rychlost

Curtius-Kniffler [45]

Jedním z nejčastěji citovaných a s kolejovou dopravou spojovaných vztahů pro stanovení adheze v závislosti na rychlosti kolejového vozidla je vztah Curtiuse a Knifflera (16). Tento vztah byl stanoven ve 40. letech minulého století sérií několika experimentů provedených přímo na reálné trati za pomoci elektrické lokomotivy.

$$\mu = \frac{7,5}{3,6v + 44} + 0,161 \quad (16)$$

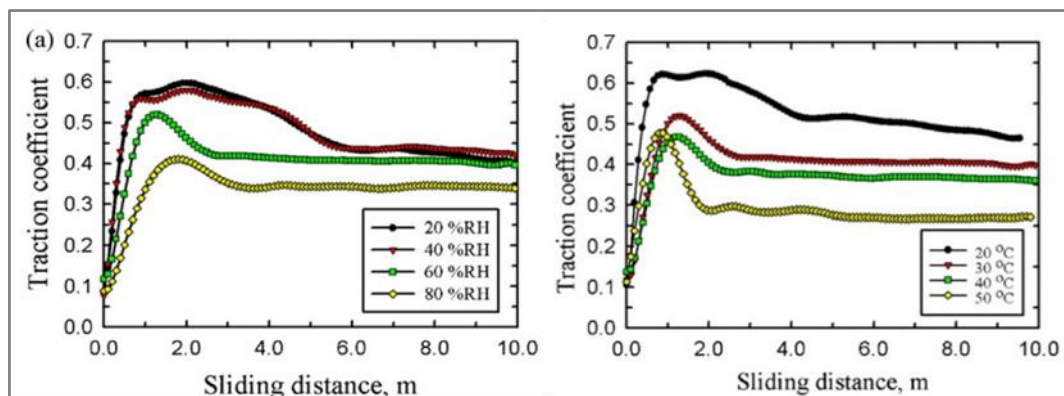
Kde:

v	[m/s]	Dopředná rychlost vozidla
-----	-------	---------------------------

1.3.3 Vliv okolních podmínek

1.3.3**Vliv teploty a vzdušné vlhkosti**

Vlivem teploty a vzdušné vlhkosti se zabýval Baek [7,16]. Ke svému výzkumu využil dvoudiskové zařízení vybavené klimakomorou. Během těchto experimentů se teplota pohybovala v rozmezí 20-50 °C a relativní vlhkost v rozmezí 20-80 %. Závěrem této práce je, že růst okolní teploty a relativní vlhkosti vzduchu přináší pokles adheze. V případě teploty došlo k poklesu součinitele adheze až o $\Delta\mu=0,3$ a v případě relativní vzdušné vlhkosti o $\Delta\mu=0,2$ (obr. 15). Vliv teploty na adhezi pozoroval také Chen [4]. V tomto případě se nejednalo o teplotu okolního prostředí, nýbrž o teplotu vody aplikované do kontaktu. Svůj experiment provedl na dvoudiskovém zařízení. Z výsledků jeho experimentu vyplývá, že teplota vody aplikované do kontaktu má na výsledky experimentů nezanedbatelný vliv a s rostoucí teplotou vody aplikované do kontaktu adheze roste. Se vzrůstem teploty vody z 5 °C na 50 °C došlo k navýšení součinitele adheze z 0,08 na 0,16.



Obr. 15 Vliv relativní vlhkosti vzduchu a teploty [7]

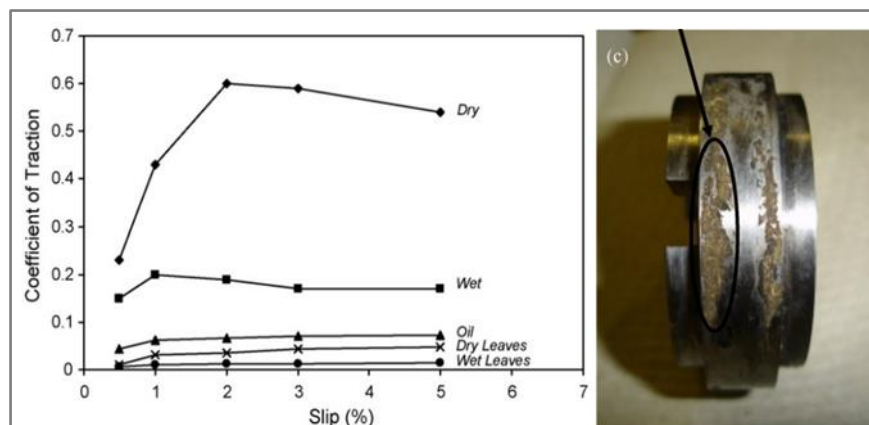
Vliv kontaminantů tratě

Vlivem kontaminantů tratě na adhezi v kontaktu se ve svých publikacích zabývali autoři Wang [14,15], Zhang [9]. Wang ve svém studiu využíval kontaminanty jako jsou voda, olej, písek, ale i emulze vody a oleje a směs vody, oleje a písku (tab. 2). Bylo zjištěno, že voda snižuje hodnotu součinitele adheze nejméně ze všech, a to pod 0,2. Emulze vody a oleje způsobovala největší pokles součinitele adheze, a to až k 0,03. Dále bylo zjištěno, že přítomnost částic písku způsobuje v kontaminovaném kontaktu zvýšení adheze. Zhang studoval adhezi v kontaktu kontaminovaném vodou a olejem. U kontaminace vodou zaznamenal pokles součinitele adheze na hodnotu 0,13 (při rychlosti 33 m/s) a u oleje na hodnotu pod 0,04 (při rychlosti 50 m/s).

Tab. 2 Průměrné hodnoty součinitele adheze pro vybrané experimenty [14,15]

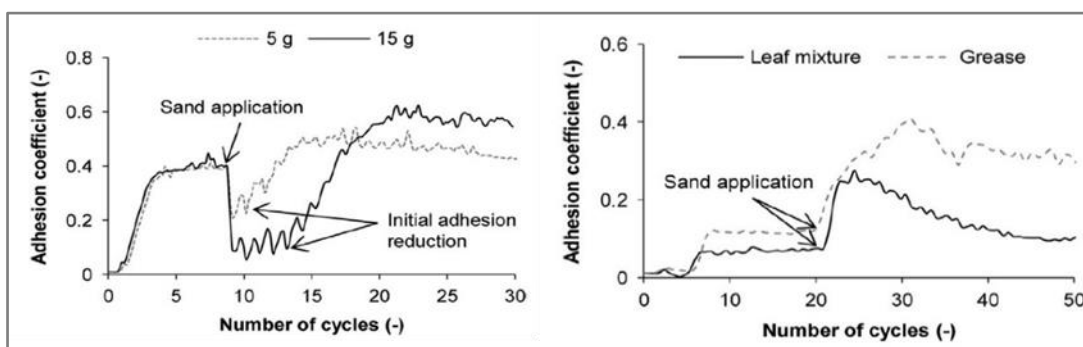
KONTAMINANT	1120 MPa	1194 MPa
bez kontaminantu	0,48	0,45
voda	0,17	0,18
voda + olej + písek	0,031	0,051
olej	0,025	0,035
voda + olej	0,018	0,03

Listím, jakožto jedním z kontaminantů se zabývali Gallardo-Hernandez [17], Omasta [18] a Arias-Cuevas [19]. Všichni jmenovaní ke svým experimentům využili dvoudiskové zařízení. U experimentů všech uvedených autorů byl po aplikaci listí do kontaktu pozorován prudký a okamžitý propad součinitele adheze až pod hodnotu 0,05 (obr. 16). Po průchodu listí kontaktem byla na povrchu disků vytvořena tvrdá kluzká a těžko odstranitelná vrstva (obr. 16). Gallardo-Hernandez provedl test mikrotvrdomosti této vrstvy a její hodnota dosahovala 59 HV_{1gr}, což odpovídalo tvrdosti uježděné vrstvy listí pozorované na reálné trati. Tentýž autor také pozoroval změny drsnosti a poškození povrchů disků v průběhu experimentu. Drsnost disků na počátku dosahovala hodnoty Ra 0,65 μm. Po testu s listím došlo vlivem vytvoření tvrdé povrchové vrstvy listí ke zdrsnění povrchů až na hodnotu 3,94 μm.



Obr. 16 Hodnoty součinitele adheze při různých kontaminantech (vlevo), tvrdá těžce odstranitelná vrstva uježděného listí (vpravo) [17]

Omasta a Arias-Cuevas se navíc zabývali i potlačením poklesu adheze po kontaminaci listím, a to prostřednictvím pískování. Omasta pro svůj experiment použil dvoudiskové zařízení. V jeho práci byl pozorován vliv pískování na adhezi v čistém a vodou, olejem a listím kontaminovaném kontaktu. Kromě kontaminace listím byla v této práci vyzkoušena i kontaminace listovým extraktem. V případě vodou kontaminovaného kontaktu (11 ml/min) byl po jednorázové aplikaci různého množství písku do kontaktu (5 g, 15 g) zaznamenán okamžitý propad adheze. Doba tohoto propadu a hodnota součinitele adheze v něm se odvíjela od množství aplikovaného písku. Jak lze pozorovat na obr.14, nastal poté opětovný růst adheze, jejíž konečná hodnota se vyšplhala až na hodnotu suchého kontaktu, tedy 0,6. Také zde bylo dokázáno, že aplikací písku do listím kontaminovaného kontaktu lze dosáhnout výrazného navýšení adheze. Po ukončení aplikace písku došlo k opětovnému poklesu adheze, a to z důvodu již zmiňované tvrdé a kluzké vrstvy listí na povrchu disků (obr. 17). Růst adheze po aplikaci písku a schopnost písku odstraňovat onu tvrdou vrstvu listí se zvyšuje s rostoucím skluzem. V této práci bylo ke kontaminaci listím využito jak samotné listí v podobě nasekaných kousků, tak listový extrakt. Po aplikaci nasekaného listí došlo k okamžitému propadu adheze, zatímco po aplikaci listového extraktu klesala hodnota součinitele adheze postupně. Po několika cyklech dosáhla adheze v případě listového extraktu podobných hodnot jako u samotného listí.



Obr. 17 Vliv množství aplikovaného písku na adhezi v kontaktu (vlevo), opětovný pokles adheze po ukončení pískování (vpravo) [18]

1.4 Friction management

1.4.1 Způsoby řízení adheze v kontaktu

Existuje celá řada přístupů, systémů a jednotek řízení adheze v kontaktu kola a kolejnice. Tyto jednotky lze rozdělit do několika kategorií, kterými jsou: pískovací jednotky, jednotky k mazání okolku a jednotky k řízení adheze na hlavě kolejnice. Pískovací jednotky se využívají k maximálnímu navýšení adheze, a to hlavně v souvislosti s kontaktem kontaminovaným listím. Jednotky k mazání okolku jsou využívány k maximálnímu snížení tření mezi okolkem kola a kolejnicí prostřednictvím oleje, plastického maziva nebo LCF modifikátoru tření. K udržování adheze na určité střední úrovni se využívají tzv. TOR (*Top-of-rail*) jednotky. Jak je podle názvu zřejmé, řízení adheze v tomto případě probíhá v místě hlavy kolejnice, a to prostřednictvím HPF modifikátoru tření. TOR jednotky řídící adhezi mohou být umístěné buď přímo na vozidle (*on-board jednotky*) nebo stacionárně na trati v určitém strategickém bodě (*off-board jednotky*).

1.4.2 Řídící systémy TOR jednotek

Systémy řízení aplikovaného množství modifikátoru u TOR jednotek mohou být buď aktivní nebo pasivní. V případě pasivních systémů, kterých je v dnešní době většina, je v určitém místě aplikováno fixní předem stanovené množství modifikátoru tření. Doporučené aplikované množství pro udržování adheze v určitém rozmezí je mnohdy udáváno přímo výrobcem modifikátoru. Jelikož u takovýchto systémů nejsou brány v potaz aktuální okolní podmínky a provozní parametry, je často stanovena příliš nízká nebo příliš vysoká dávka modifikátoru, a ne vždy je dosaženo výsledků garantovaných jeho výrobcem, o čemž se přesvědčil i Khan [32]. Ten ve svém experimentu pozoroval změny chování v kontaktu kola a kolejnice za použití off-board aplikační jednotky. Náplní této jednotky byl komerční modifikátor KELTRACK® TRACKSIDE FREIGHT™ ER, u něhož výrobce uvádí garantovanou hodnotu adheze v rozmezí 0,3-0,4 při dodržení aplikovaného množství 0,25 l na 1000 projetých náprav. Také vzdálenost roznesení modifikátoru byla stanovena na 3,2-6,4 km. Při testech na reálné trati s aplikací dvojnásobného doporučeného množství modifikátoru byly provedeny testy chemického složení na povrchu kolejnice, přičemž bylo zjištěno roznesení modifikátoru do vzdálenosti pouhých 70 m od místa aplikace.

Druhou a méně frekventovanou variantou je aktivní řídící systém, který na základě aktuálních provozních parametrů vyhodnotí vhodné množství modifikátoru, které je nutné pro udržení adheze v určitém rozmezí. Tento systém je ekonomicky výhodnější a pro okolní prostředí vhodnější, jelikož nedochází k aplikaci zbytečně velkého množství modifikátoru. Jeden takovýto systém ve své publikaci částečně popisuje Davis [33]. Uvádí, že jejich on-board aplikační jednotka vyhodnocuje optimální množství na základě aktuální rychlosti, zatížení, úhlu náběhu kola do traťového oblouku, okolní teplotě, směru jízdy, a pozici lokomotivy. Na podobných parametrech zakládá svoji TOR jednotku i Kumar [50]. Jeho (on-board) jednotka vyhodnocuje potřebné množství modifikátoru na základě aktuální rychlosti vozidla, zakřivení tratě, teplotě modifikátoru, zatížení a počtu náprav. Kumar ve svém patentu navíc uvedl i obecný vztah vyhodnocující požadované množství modifikátoru (17), kterým se řídí jeho TOR jednotka.

Každý takovýto systém je ovšem originál a jeho know-how je tajemstvím každého výrobce. Z toho důvodu nejsou známy bližší detaily většiny aktivních řídicích systémů. Některé aktivní řídicí systémy využívají existující predikční vztahy a modely udávající adhezi v závislosti na některých provozních parametrech a okolních podmínkách [viz. vztahy (8-16)].

$$R_m = K \cdot K_D \cdot D \cdot C_L \cdot T \cdot v \cdot N_w \quad (17)$$

Kde:

R_m	Požadované množství modifikátoru
K	Konstanta hardwaru
K_D	Konstanta zakřivení tratě
D	Úhel náběhu
C_L	Konstanta okolní teploty
T	Okolní teplota
v	Rychlost vozidla
N_w	Celková hmotnost vagónů

1.4.3 Charakteristika modifikátoru tření

1.4.3

Modifikátor tření je tuhá, tekutá nebo polotekutá látka, jejíž funkcí je udržovat součinitel adheze v kontaktu kola a kolejnice na určité předem stanovené hodnotě. Při příliš nízkém součiniteli adheze dochází k prokluzu kola nebo prodloužení brzdné dráhy, což má za následek snížení bezpečnosti. Naopak s příliš vysokým součinitelem adheze přichází nadměrné opotřebení kola i kolejnice, dochází ke zvýšení hladiny akustické emise a zvyšuje se riziko vykolejení, a to zejména v traťových obloucích. Dalším účelem použití modifikátoru tření je potlačení negativního trendu trakční křivky, se kterým přichází tzv. *stick-slip* efekt, který je v kolejové dopravě označován jako *roll-slip*. Roll-slip efekt je následně iniciátorem negativních jevů, jako jsou vlnkovité opotřebení tratě, zvýšení hladiny hlukové emise atd. Úkolem modifikátoru tření je tedy tyto provozní extrémy odstranit a míru adheze v daných částech trati optimalizovat. [25]

Složení modifikátorů tření je navrhováno tak, aby jeho složky po průchodu kontaktem reagovaly s třecími produkty, oxidy, otěrovými částicemi a následně vytvořily třecí vrstvu o požadovaných vlastnostech poskytující požadovaný součinitel adheze. Modifikátory tření se skládají z následujících částí [20, 21, 49]:

- **Základní báze** – podle druhu základní báze se modifikátory dělí na olejové a vodní. V některých případech tvoří základní báze až 90 % složení.
- **Zahušťovadlo** – slouží k vytvoření požadované konzistence a zároveň brání k usazování pevných částic.
- **Částice pro modifikaci tření** – pevné částice různého tvaru a velikosti sloužící k samotné modifikaci adheze v kontaktu, resp. k docílení pozitivního trendu trakční křivky.
- **Smáčedlo** – slouží k snížení povrchového napětí kapaliny z důvodu lepšího pokrytí kontaktních těles a ulpění modifikátoru na nich.
- **Tuhá maziva**

- **Ostatní přísady** – např. látky měnící regulující bod tuhnutí, stabilizátory, kovové částice k detekci vlaku na trati

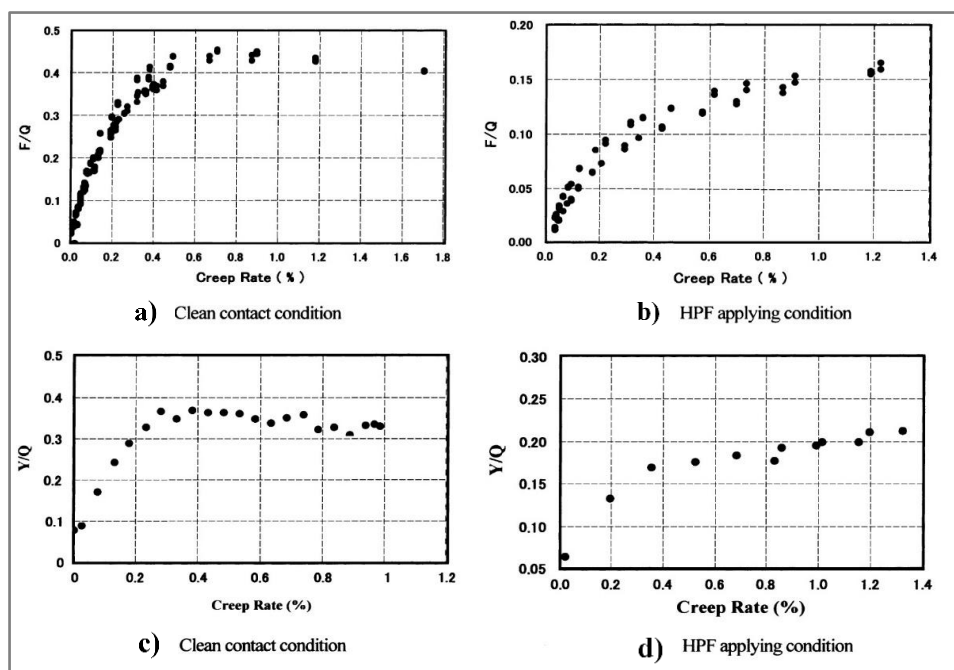
Podle funkce existují tři základní druhy modifikátorů. Jedná se zejména o [22-23]:

- **LCF** („*low coefficient of friction*“) – Nejedná se o typické modifikátory tření. Jsou to spíše maziva, jejichž cílem je udržovat koeficient tření na konstantní nízké úrovni (do 0,1). Využívají se nejčastěji k redukci tření mezi okolkem kola a kolejnici v traťových obloucích
- **HPF** („*high positive friction*“) – Jedná se již o klasický modifikátor tření mající udržet hodnotu koeficientu tření na předem stanovené střední hodnotě (běžně okolo 0,3), snížit hladinu akustické emise a míru opotřebení. Aplikuje se na jízdní plochu kola nebo hlavu kolejničky.
- **VHPF** („*very HPF*“) – Jedná se o opak LCF modifikátoru. Jeho úkolem je maximalizovat součinitel adheze.

1.4.4 Experimentální studium modifikátoru tření v kolejové dopravě

Mezi jedny z prvních autorů zabývajících se studiem modifikátoru tření v kolejové dopravě se řadí Matsumoto [24]. Matsumoto ve své práci studoval vliv komerčního HPF modifikátoru tření na adhezi jak v podélném, tak v laterálním směru, čímž simuloval průjezd vozidla traťovým obloukem. K tomuto účelu využil dvoudiskové zařízení v měřítku 1:5 se schopností natáčet vůči sobě kontaktní disky. Kontaktní podmínky byly zvoleny následovně: rychlost 10 km/h, zatížení 1000 N a úhel náběhu disku $\pm 0,6^\circ$.

Jak je patrné z výsledků na obr. 18, byla prokázána schopnost HPF modifikátoru tření potlačit negativní trend trakční křivky, ke kterému docházelo u čistého kontaktu. Také zde byla pozorována schopnost modifikátoru snížit hodnotu adheze o více jak 50 % oproti čistému kontaktu.



Obr. 18 Výsledky aplikace HPF modifikátoru v podélném (a,b) a laterálním (c,d) směru [24]

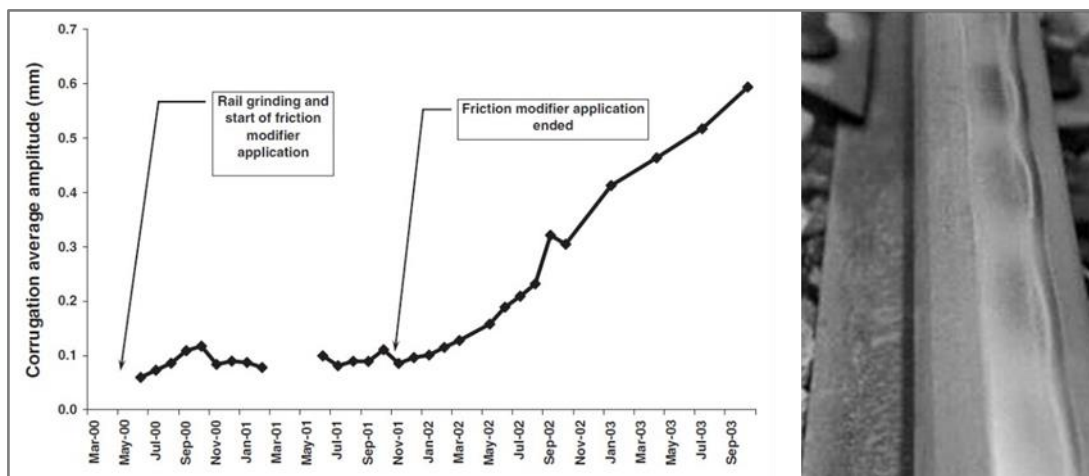
Vliv modifikátoru tření na hlukovou emisi a vlnkovité opotřebení tratí popisuje ve své práci Eadie [26]. Své studium provedl na několika traťových obloucích pro různé železniční systémy (tramvaj, osobní vlak, metro), přičemž pozoroval změny opotřebení a hlukové emise po aplikaci modifikátoru tření. Modifikátorem v této práci byl komerční tekutý modifikátor založený na vodní bázi. Jak lze pozorovat na obr. 19, u všech uvedených tratí došlo po aplikaci modifikátoru tření ke snížení hladiny hlukové emise. Průměrná hodnota tohoto snížení činila 12 dB. Nejmenší redukce hluku byla pozorována u tratí s nejvýraznějším vlnkovitým opotřebením, z čehož přímo plynula velká část hlukové emise. Naopak největší redukce se projevila na nově otevřené trati (Velká Británie), a to až o 23 %.

System number	1	2	3	4	5
Country	Spain	Italy	Spain	Netherlands	United Kingdom
System type	Metro	Tram	Light Rail	Tram	Tram
Curve radius (m)	220	25 (est.)	250	25	26
Speed (km/h)	50	5–10	65	10–15	15
Axle per car	4	8	4	8	6
Cars per train	6	1	6	1	1
Rail type/wt	UIC 54	AP4N Phoenix Type	UIC 54	RI 59	41G
Brake type	Disk	Disk	Disk	Disk	Disk
Gauge face lubrication	Onboard oil	Onboard oil	Onboard oil	Trackside oil	Onboard oil
Friction modifier	Automatic trackside	Manual	Manual	Manual	Manual
Application method					
Ave L_{Aeq} baseline (dB)	101.4	92.9	80.4	86.7	98.2
Ave L_{Aeq} friction modifier (dB)	95.1	83.1	72.5	73.3	75.4
Track condition	Corrugated	Worn	Corrugated	Worn	New
Track structure	Concrete sleepers/ballast	Imbedded	Concrete sleepers/ballast	Imbedded	Imbedded

Obr. 19 Vliv modifikátoru tření na hladinu hlukové emise na vybraných tratích [26]

Vliv modifikátoru na vlnkovité opotřebení byl pozorován pouze na trati č. 1 (Španělské metro). Ihned po jejím přebroušení byla zavedena aplikace modifikátoru

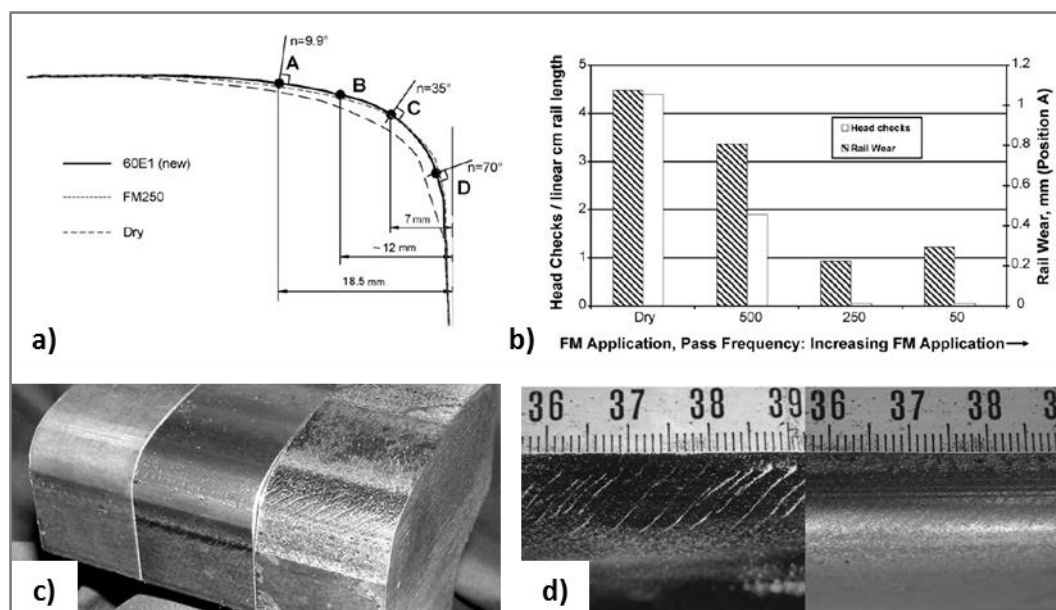
a pozorován růst vlnkovitého opotřebení. Po celou dobu aplikace nedocházelo k výraznějšímu nárůstu tohoto opotřebení, avšak poté co byl po několika měsících modifikátor tření vysazen z provozu, nastal náhlý a rychlý růst vlnkovitého opotřebení (obr. 20). Tímto Eadie prokázal pozitivní vliv HPF modifikátoru tření na redukci hlukové emise a současně vlnkovitého opotřebení kolejnic.



Obr. 20 Nárůst vlnkovitého opotřebení po ukončení aplikace modifikátoru tření [26]

V jednom ze svých dalších výzkumů se Eadie [27] zabýval vlivem modifikátoru tření na kontaktní únavu, opotřebení a plastické tečení kontaktních těles. K tomuto účelu bylo využito wheel on rail zařízení s reálnými kontaktními tělesy. Experiment probíhal při zatížení 23 t a rychlosti 1 m/s. Vybraným modifikátorem pro tento experiment byl komerční modifikátor na olejové bázi. Byl nanášen jak na hlavu kolejnice, tak na projížděnou hranu.

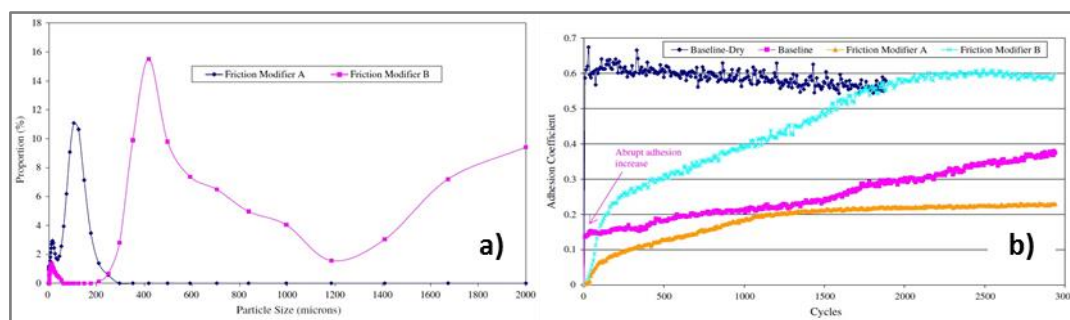
Na obr. 21a a obr. 21b lze vidět stav kolejnice po testu bez modifikátoru a s ním. Ze znázorněných profilů kolejnic je patrné, že kolejnice s aplikací modifikátoru tření se i po testu svým profilem velmi podobá nové kolejnici a nevykazuje výraznější známky opotřebení. Oproti tomu na kolejnici bez aplikace modifikátoru lze pozorovat výraznější opotřebení, zvýšenou drsnost a větší počet trhlin na jejím povrchu (obr. 21c, obr. 21d). Na tvorbu trhlin, opotřebení a změny drsnosti povrchu se v této práci nahlíželo také z pohledu intervalu aplikace modifikátoru. Z výsledků na obr. 21b, který popisuje počet trhlin na 1 cm a opotřebení profilu kolejnice v bodě A, je zřejmé, že ideální interval aplikace je okolo 250 cyklů. Při vyšší frekvenci již opět nastává růst opotřebení.



Obr. 21 a) změna profilu kolejnice, b) hmotnostní úbytek kolejnice, c,d) trhliny na povrchu kolejnice[27]

Z Eadieho [27] výsledků vyplývá schopnost modifikátoru tření (při správném aplikačním intervalu) výrazně redukovat, zpomalit nebo dokonce zastavit růst trhlin, snížit opotřebení, drsnost a plastické tečení materiálu.

Studiem vlivu modifikátoru tření na kontakt kontaminovaný listím se zabýval Li [29]. Svůj experiment provedl na dvoudiskovém zařízení při rychlosti 1 m/s a zatížení 4,7 kN, což v daném případě odpovídalo kontaktnímu tlaku 1,2 GPa. Skluz byl volen 0,5, 1 a 2 %. Pro přípravu vrstvy listí na povrchu disků byly disky při suchém kontaktu a skluzu 0,5 % zaběhnuty. Následně bylo přidáno listí a proveden dalších 300-400 cyklů. Tím byla vytvořena vrstva listí, jejíž tloušťka se pohybovala mezi 3-13 μm a tvrdost 47-68 HV. V této práci byly využity a porovnány dva komerční modifikátory založené na vodní bázi pod označením FMA a FMB. Li popisuje FMA jako modifikátor obsahující několik druhů pevných částic, polymerních částic a vodu. FMB je popsán jako modifikátor skládající se z anorganického zahušťovadla, stabilizátoru, částic písku, částic korozi-vzdorné oceli a vody. Ocelové částice jsou obsaženy v FMB z důvodu stálé elektrické vodivosti kontaktu a detekci vozidla na trati. Byla také provedena analýza tvrdosti částic obou modifikátorů. V případě ocelových částic FMB modifikátoru byla naměřena tvrdost 320 HV a u části písku 1500 HV. Tvrdost částic u FMA nebylo možné změřit z důvodu jejich malé velikosti. Rozbor velikostí částic obou modifikátorů lze pozorovat na obr. 22a. Po aplikaci listí došlo k propadu adheze mezi hodnoty 0,01-0,04. U modifikátoru FMB byl pozorován největší vliv na obnovu adheze a odstranění tvrdé kluzké vrstvy listí na povrchu disků (obr. 22b). Jako klíčové parametry pro obnovu adheze v listím kontaminovaném kontaktu byla v této práci stanovena tvrdost a velikost částic modifikátoru tření. Na druhou stranu pouze u FMB byly po experimentu pozorovány na povrchu disků velké plastické deformace způsobené velkými a tvrdými částicemi písku a oceli.



Obr. 22 a) analýza velikosti částic, b) vliv modifikátorů na obnovu adheze v kontaktu [29]

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

2

2.1 Shrnutí poznatků z kritické rešerše

2.1

V úvodu práce byly stanoveny hodnoty adheze vhodné pro jednotlivé fáze provozu kolejového vozidla. Pro brzdění to znamená $\mu > 0,14$ a pro trakci $0,1 < \mu < 0,3$. Tento fakt bude využit jakožto jedno z kritérií při vyhodnocování výsledků adheze po aplikaci daného množství modifikátoru za daných kontaktních podmínek.

Na základě rešeršní části lze říct, že faktory ovlivňující adhezi v kontaktu kola a kolejnice lze rozdělit do dvou hlavních kategorií, kterými jsou provozní parametry a okolní podmínky.

Mezi provozní parametry ovlivňující adhezi se řadí rychlost, skluz, zatížení a úhel náběhu kola do traťového oblouku. Z publikací [7,9,14-16,18] vyplývá, že s rostoucí rychlostí klesá adheze, a to jak u čistého, tak kontaminovaného kontaktu. U vodou, olejem nebo listím kontaminovaného kontaktu se však tento efekt minimalizuje a rozdíl adheze při změnách rychlosti již není tak výrazný, jako u suchého kontaktu. Co se týče zatížení, bylo zjištěno, že s rostoucím zatížením za suchých podmínek klesá hodnota součinitele adheze [9, 14-15]. Přesně opačný trend ovšem zaznamenal Baek [7,16]. Jelikož se ani jedna z uvedených publikací nevěnuje tvorbě a složení třecí vrstvy a opotřebení kontaktních těles v průběhu experimentů, nelze s jistotou říci, čím bylo zapříčiněno dosažení opačných trendů. Na druhou stranu, v případě obou trendů, nedocházelo při změnách zatížení za suchých podmínek k výraznějším změnám součinitele adheze. Navíc se všichni autoři shodují, že změny zatížení při vodou, olejem nebo listím kontaminovaném kontaktu nemají na změny adheze v kontaktu výraznější vliv a její hodnota zůstává téměř stejná. Skluz simulovaný u většiny autorů se pohybuje v rozmezí 0-10 %, což by mělo reflektovat reálnou situaci v kontaktu kola a kolejnice.

Mezi okolní podmínky se řadí teplota, vlhkost a kontaminanty tratě, a to zejména voda, olej, listí. Samotná voda je považována za nejběžnější kontaminant. Po její aplikaci do kontaktu dochází k poklesu adheze na hodnotu přibližně 0,2 a níže [4, 9, 14,17]. Chen [4] také uvádí, že s rostoucí teplotou vody roste adheze v kontaktu. Během experimentů s kontaminací vodou by měl být tedy kladen důraz na dodržování konstantní teploty vody u všech experimentů tak, aby byly jejich výsledky vzájemně porovnatelné a nedocházelo k jejich zkreslení. Wang [15] uvádí, že voda v kombinaci s olejem způsobuje větší pokles adheze než kontaminace pouze olejem nebo vodou, a to až na hodnotu 0,025. Použití olejového modifikátoru, který byl pro tuto práci vybrán, by v kombinaci s deštěm mohlo teoreticky znamenat velké ztráty adheze pro kolejové vozidlo. Za nejnebezpečnější kontaminant je považováno listí, a to hned ze dvou důvodů. Po průchodu kontaktem vytváří tvrdou a kluzkou vrstvu, kterou lze efektivně odstranit pouze pískováním, případně některými VHPF modifikátory [29]. Druhým důvodem je největší pokles adheze ze všech uvedených kontaminantů. Podle Gallarda-Hernandeze [17] dochází k poklesu adheze až na hodnotu 0,01. Pro posouzení vlivu modifikátoru na listím kontaminovaný kontakt se v této práci jako nejlepší řešení jeví použití převážně listového extraktu, který popisuje Machatka [3]. Listový extrakt oproti samotnému listí nezpůsobuje plastické deformace povrchů kontaktních těles a také poskytuje stabilnější podmínky průběhu experimentů. Adheze v kontaktu se při kontaminaci extraktem podle Machatky [3] pohybuje okolo 0,1. To je

oproti kontaminaci samotným listím sice mnohem vyšší hodnota, ale pro trakci kolejového vozidla stále kritická.

Jako nejlepší variantu experimentálního zařízení lze na základě rešerše stanovit dvoudiskové zařízení. Oproti zařízením s kontaktními tělesy v reálné velikost sice způsobuje určité měřítkové zkreslení, ale je cenově mnohem přijatelnější a poskytuje přesnější nastavení a větší kontrolu nad provozními parametry. MTM není podle Galase [11] zase vhodné pro měření trakčních křivek a simulaci jejich negativního průběhu.

Dle publikací [6-8, 43] probíhá kontakt kola a kolejnice výhradně prostřednictvím tzv. třetího tělesa tzn. prostřednictvím třecí vrstvy mezi nimi. Byly popsány nejběžnější oxidické produkty vznikající v souvislosti s kontaktem kola a kolejnice a také vliv okolní teploty a relativní vlhkosti na jejich tvorbu. Z výsledků těchto studií vyplývá, že adheze v kontaktu je poměrně citlivá na složení této vrstvy, na koncentraci jednotlivých oxidů a na okolních klimatických podmínkách. Z toho důvodu je v této práci kladen důraz na zachování stejných kontaktních podmínek pro většinu experimentů, tzn. udržování konstantní pokojové teploty a zejména provedení záběhu kontaktních těles před každým experimentem.

Při navrhování aktivního systému reálné aplikační jednotky nelze vycházet ze současných komerčně dostupných aplikačních jednotek, jelikož řídicí systém kterýkoliv z nich je utajovaným know-how každého výrobce. Z patentové studie a ze studie komerčních produktů vyplývá, že současné aktivní systémy TOR jednotek vychází z parametrů jako jsou aktuální rychlost vozidla, skluz, zatížení, zakřivení tratě, počet náprav a v některých případech také teplota. V souvislosti s touto problematikou byl také vytvořen přehled několika vztahů (8-16) predikujících adhezi v závislosti na aktuální rychlosti a skluzu. Tyto vztahy poslouží k porovnání s experimentálně získanými daty a následnému zakomponování do navrhovaného řídicího systému.

2.2 Analýza problému

Jak již bylo uvedeno v kapitole 1, kolejovou dopravu doprovází řada negativních jevů. Jsou to např. prodloužení brzdné dráhy nebo ztráta trakce a schopnosti akcelerace z důvodu nadměrného snížení adheze. Snížení adheze v kontaktu kola a kolejnice je nejčastěji způsobeno biologickými kontaminanty, vlhkostí nebo také olejem. Ne méně častým je také problém s příliš vysokou adhezí v určitých úsecích tratě. S příliš vysokou adhezí a negativním trendem trakční křivky přichází nadměrné opotřebení kola a kolejnice, a to v několika podobách jako je např. vlnkovité opotřebení kolejnic, plastické tečení materiálu apod. Negativní trend trakční křivky a její bod saturace je také iniciátorem zvýšené hladiny hlukové emise. Všechna tato negativa tedy plynou z příliš nízké nebo vysoké adheze a jevů souvisejících s negativní adhezní charakteristikou. Jejich řešením je řízení adheze v kontaktu kola a kolejnice, a to za použití k tomuto účelu navržených kompozic – modifikátorů tření.

2.3 Podstata a cíl diplomové práce

Cílem práce je popsat optimální množství modifikátoru tření v závislosti na okolních a provozních podmínkách (teplota, zatížení, rychlost, skluz, kontaminanty atd.) a vytvořit databázi experimentálních dat, které budou sloužit jako podklady pro řídicí systém reálné aplikační jednotky, jejímž cílem je řízení adheze v kontaktu kola

a kolejnice za použití modifikátoru tření. Součástí práce bude rešeršní studie, zprovoznění experimentální aparatury, návrh metodiky experimentu, vyhodnocení dat a také návrh schématu aktivního řídicího systému reálné aplikační jednotky.

2.4 Výstupy práce

2.4

Předpokládaným výsledkem řešení diplomové práce, v kategoriích definovaných pro základní výzkum v souladu s platnou metodikou hodnocení výsledků výzkumu a vývoje, je:

- článek v konferenčním sborníku,
- databáze experimentálně získaných dat jakožto podklad pro řídicí systém aplikační off-board jednotky,
- schéma řídicího systému aplikační off-board jednotky.

2.5 Odůvodnění nutnosti a potřebnosti řešení

2.5

Z důvodu udržení efektivnosti a atraktivnosti kolejové dopravy je nutné redukovat její negativní jevy, kterými jsou např. nadměrné opotřebení kol a kolejnic, zvýšená hluková emise atd. Jedním ze způsobů, jak redukovat tyto problémy je vývoj on-board a off-board aplikačních jednotek řídicích adhezi v kontaktu kola a kolejnice za pomoci modifikátoru tření.

Výsledky této diplomové práce poslouží jako podklady pro řídicí software aplikační jednotky aktivního řízení adheze v kontaktu, která je vyvíjená v rámci projektu Technologické agentury České republiky s názvem *Výzkum a vývoj systému pro aktivní řízení adheze v kolejové dopravě*. Následným zavedením tohoto systému do provozu bude dosaženo:

- optimalizace hodnoty adheze, což přinese snížení opotřebení kolejnic a kol, z čehož plyne i značná finanční úspora.
- stabilizace úrovně adheze, což sníží negativní dopady přirozených kontaminantů v kontaktu.
- pozitivního vývoje adhezní charakteristiky, díky kterému bude redukována hlukost, což je žádoucí zejména v rezidenčních oblastech nebo historických centrech.

3 MATERIÁL A METODY

K účelu tohoto studia poslouží dvoudiskové zařízení. Toto zařízení nebylo ovšem doposud reálně sestaveno, a proto je nutné jej sestavit, zapojit a celkově odladit jeho měřicí řetězec. Po sestavení a odladění zařízení je jeho funkčnost ověřena verificačními experimenty a zaznamenané výsledky jsou vyhodnoceny a porovnány s výsledky autorů v řešeršní části.

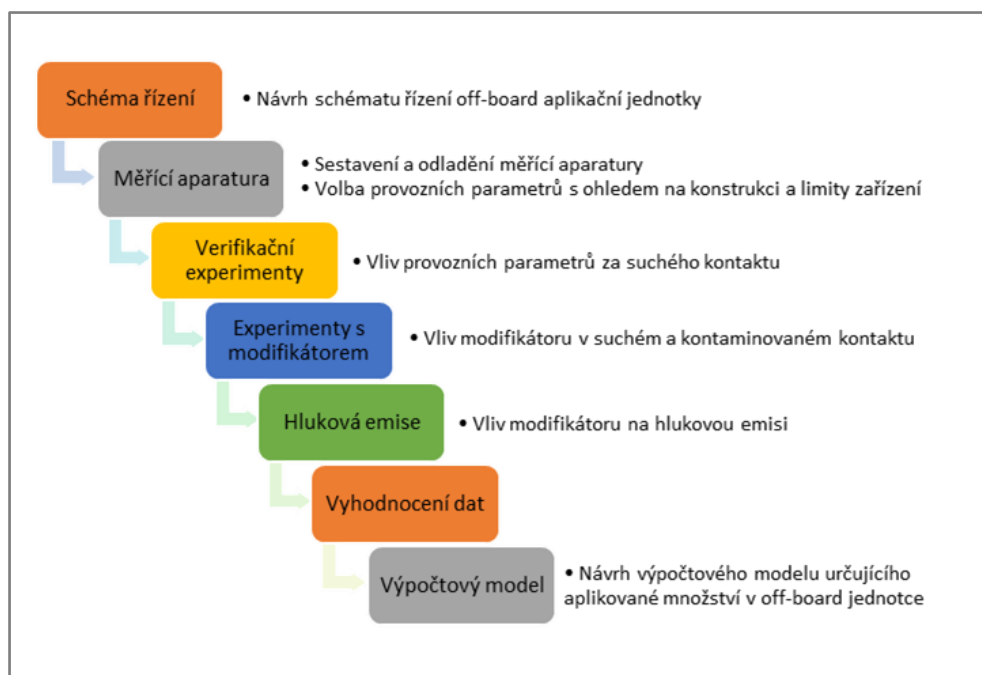
Před zahájením samotného experimentu jsou zvoleny provozní parametry zařízení tak, aby co nejlépe odpovídaly provozním podmínkám v kontaktu kola a kolejnice reálného kolejového vozidla. Tyto parametry jsou voleny s ohledem na konstrukci experimentálního zařízení a jeho limity.

Testovaným modifikátorem je v této práci modifikátor Sintono Terra HLK od společnosti Lubcon. Jedná se o komerční produkt využívaný k řízení adheze v dopravě kolejových vozidel. Modifikátor je založen na olejové bázi a řadí se ke skupině HPF modifikátorů, tedy modifikátorů, které s rostoucím skluzem poskytují rostoucí koeficient adheze a pozitivní trend trakční křivky bez bodu saturace, za nímž dochází k stick-slip efektu.

Jelikož je tato práce zaměřena na experimentální studium modifikátoru tření za různých kontaktních podmínek, zabývá se tato studie i vlivem modifikátoru tření na kontaminovaný kontakt. Je simulován kontakt kontaminovaný nejběžnějšími kontaminanty reálných tratí, jako jsou voda nebo v podzimních obdobích vyskytující se spadené listí. Kromě studia vlivu modifikátoru tření na adhezi v kontaktu je studován i vliv toho modifikátoru na redukci hlukové emise během simulace průjezdu kolejového vozidla traťovým obloukem.

Z hlediska zkoumání vlivu množství modifikátoru tření na simulovaný kontakt kola a kolejnice je důležitý způsob a přesná aplikace daného modifikátoru. K tomuto účelu je využita laboratorní mikropipeta schopná aplikovat minimální množství až jeden mikrolitr.

Na závěr jsou získané výsledky zpracovány s ohledem na využití naměřených dat pro návrh řídicího softwaru reálné off-board aplikační jednotky. Postup řešení v této práci lze pozorovat na obr. 23.



Obr. 23 Postup řešení této práce

3.1 Experimentální zařízení

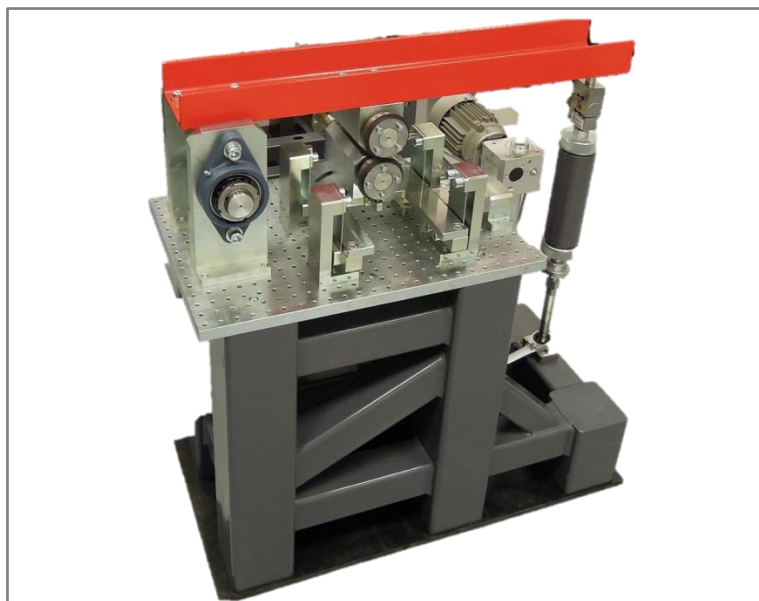
3.1

3.1.1 Dvoudiskové zařízení

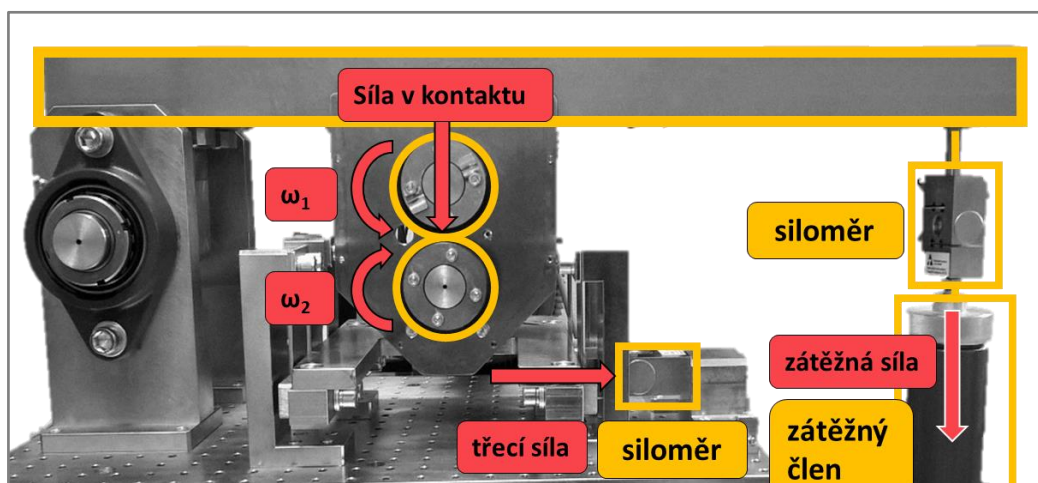
3.1.1

Použitým zařízením v této práci je dvoudiskové zařízení (obr. 24 a jeho schéma na obr. 25). K tomuto účelu slouží dva po sobě odvalující se disky, kterým lze nastavit různé zatížení, respektive kontaktní tlak, rychlost, vzájemný skluz nebo úhel náběhu jednoho z disků v případě simulace průjezdu kolejového vozidla traťovým obloukem.

Toto zařízení se skládá ze dvou rámu, a to nosného rámu pohonů a nosného rámu samotného dvoudiskového zařízení. Nosný rám pohonů obsahuje dva elektromotory o výkonu 15 kW. Elektromotory pohání nezávisle na sobě oba z disků, a to prostřednictvím kardanových hřídelů. Druhý rám nese samotné dvoudiskové zařízení. Horní z dvojice disků je umístěn na kyvném rámu. Tento rám funguje jako páka, přičemž na jednom konci je upevněn pomocí hřídele s ložisky. Jeho druhý konec je zatěžován pomocí zátěžného členu. Zátěžný člen se skládá ze závitové tyče, kterou se vyvozuje zatížení a z pružiny tlumící rázy vznikající během chodu v kontaktu disků. Kromě zátěžného členu se na tomto konci kyvného rámu nachází i zdvižná převodovka. Zdvižný člen slouží k okamžitému odlehčení kyvného rámu, přetlačení zátěžného členu a přerušení kontaktu mezi oběma disky. Druhý z disků je upevněn na rámu, který je situován přímo pod horním diskem. Celý tento rám je zavěšen na pásovině, díky čemuž je schopný přenášet třecí sílu z kontaktu obou disků. Třecí a zátěžná síla jsou snímány pomocí tenzometrických snímačů. Z třecí síly a síly v kontaktu je následně vyhodnocen součinitel adheze.

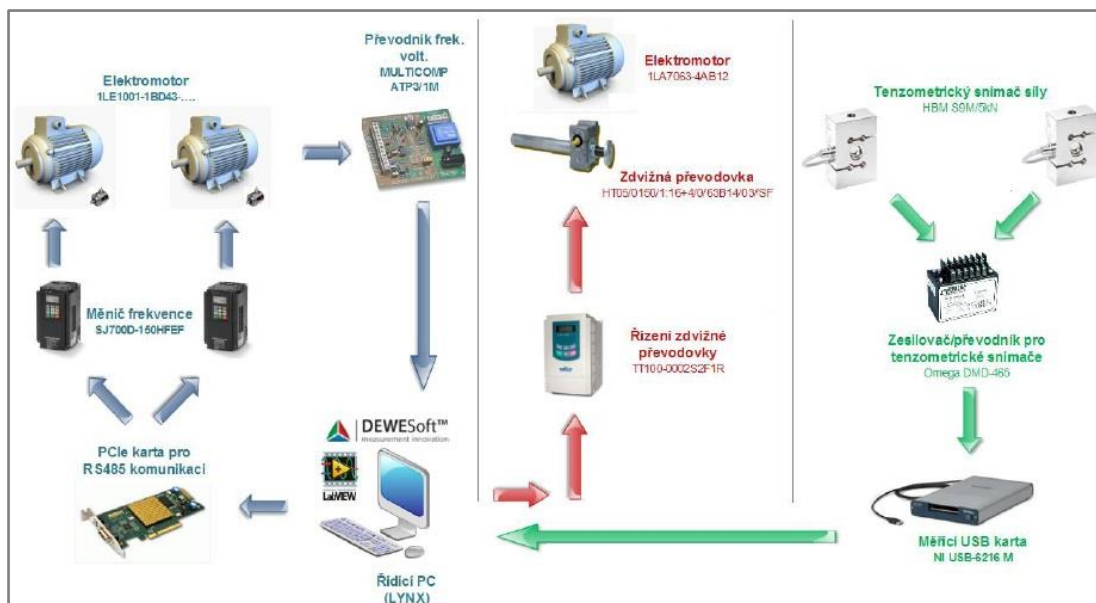


Obr. 24 Použité experimentální zařízení



Obr. 25 Schéma experimentálního zařízení

Měřicí řetězec dvoudiskového zařízení se skládá ze tří hlavních větví (obr. 26). První větev řídí ovládání elektromotorů a řízení jejich otáček. Tato větev obsahuje řídicí PC, PCIe kartu, frekvenční měniče, frekvenční převodník a samotné motory. Otáčky elektromotorů jsou řízeny přímo z řídicího PC přes PCIe kartu a frekvenční měniče. Pomocí inkrementálního čidla každého z motorů jsou informace o aktuálních otáčkách přes frekvenční převodník přenášeny zpět do řídicího PC. Druhá větev je zátěžná a obsahuje zátěžný člen spolu se zdvižnou převodovkou a frekvenčním měničem pro tuto převodovku. Třetí větví je větev měřicí. Obsahuje tenzometrické snímače pro třecí a zátěžnou sílu. Signály z těchto snímačů jsou vedeny přes převodník do měřicí USB karty. Z této karty jsou následně přenášeny do řídicího PC a zaznamenávány pomocí softwaru Dewesoft.



Obr. 26 Měřicí řetězec experimentálního zařízení [21]

3.1.2 Podmínky experimentu a nastavení experimentálního zařízení

3.1.2

Experimentální dvoudiskové zařízení umožňuje nastavení celé řady kontaktních parametrů jako jsou rychlost, zatížení, skluz a úhel náběhu disku. Přehled jednotlivých parametrů nastavení experimentální aparatury v této práci lze pozorovat v tab. 3.

Tab. 3 Přehled nastavení parametrů experimentálního zařízení

Rychlost	0,5-2,5 m/s
Zatížení	0,6-1 GPa
Skluz	0-10 %
Úhel náběhu disku	0-10°
Teplota	Pokojová (20-24 °C)

Rychlost

Rychlost je pro většinu experimentů volena od 0,5 m/s až po 2,5 m/s. Ačkoliv je rychlost 2,5 m/s poměrně vzdálená od běžných provozních rychlostí kolejových vozidel, není experimentální zařízení schopné dosahovat větších rychlostí, a to z důvodu jeho konstrukčních limit a vlastních frekvencí některých jeho částí. Pro predikci adheze při vyšších rychlostech následně poslouží data naměřená při zmiňovaných rychlostech a také predikční vztahy získané v rešeršní části.

Skluz

Skluz mezi kontaktními tělesy je volen od 0 % do 10 %, což odpovídá experimentům provedeným v rešeršní části a pokrývá reálně se vyskytující skluzy v kontaktu kola a kolejnice.

Zatížení

S přihlédnutím na vozový park Dopravního podniku města Brna [39] a běžně využívané kolejnici S49 je za pomoci Hertzovi teorie stanoven maximální tlak v kontaktu kola a kolejnice. V případě plně obsazených tramvají a nepřilíš

opotřeбенých kol a kolejnic se tento tlak pohybuje až okolo 0,8 GPa. U opotřeбенých kontaktních těles je kontaktní tlak nižší. Pro většinu experimentů je volena horní hranice kontaktních tlaků — 0,8 GPa. Rozmezí 0,6-1 GPa by mělo během studia vlivu zatížení i s rezervou pokrýt běžně se vyskytující kontaktní tlaky v tramvajové dopravě. Pro výpočet reálných kontaktních tlaků a kontaktních tlaků na dvoudiskovém zařízení je využito Hertzovi teorie a následujících vztahů (18-22) pro eliptický kontakt dvou elastických obecně zakřivených těles [44].

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y} = \frac{1}{R_{ax}} + \frac{1}{R_{bx}} + \frac{1}{R_{ay}} + \frac{1}{R_{by}} \quad (18)$$

$$\frac{1}{E'} = \frac{1}{2} \left[\frac{1 - \nu_A^2}{E_A} + \frac{1 - \nu_B^2}{E_B} \right] \quad (19)$$

$$\bar{k} = 1,0339 \left(\frac{R_y}{R_x} \right)^{0,636}, \bar{\varepsilon} = 1,0003 + \frac{0,5968 R_x}{R_y} \quad (20)$$

$$a = \left(\frac{6 \bar{k}^2 \bar{\varepsilon} W R'}{\pi E'} \right)^{1/3}, b = \left(\frac{6 \bar{\varepsilon} W R'}{\pi \bar{k} E'} \right)^{1/3} \quad (21)$$

$$p_{max} = \frac{3W}{2\pi ab} \quad (22)$$

Kde:

R'	[m]	Redukovaný poloměr křivosti
R_a	[m]	Redukovaný poloměr křivosti tělesa A
R_b	[m]	Redukovaný poloměr křivosti tělesa B
R_{ax}	[m]	Redukovaný poloměr křivosti tělesa A ve směru osy x
R_{bx}	[m]	Redukovaný poloměr křivosti tělesa B ve směru osy x
R_{ay}	[m]	Redukovaný poloměr křivosti tělesa A ve směru osy y
R_{by}	[m]	Redukovaný poloměr křivosti tělesa B ve směru osy y
a	[m]	Délka hlavní poloosy
b	[m]	Délka vedlejší poloosy
W	[N]	Zátěžná síla
E'	[Pa]	Redukovaný Youngův modul pružnosti
E_A	[Pa]	Youngův modul pružnosti třecího povrchu tělesa A
E_B	[Pa]	Youngův modul pružnosti třecího povrchu tělesa B
ν_A	[-]	Poissonova konstanta třecího povrchu tělesa A
ν_B	[-]	Poissonova konstanta třecího povrchu tělesa B
$\bar{\varepsilon}$	[-]	Zjednodušený eliptický integrál
\bar{k}	[-]	Eliptický parametr

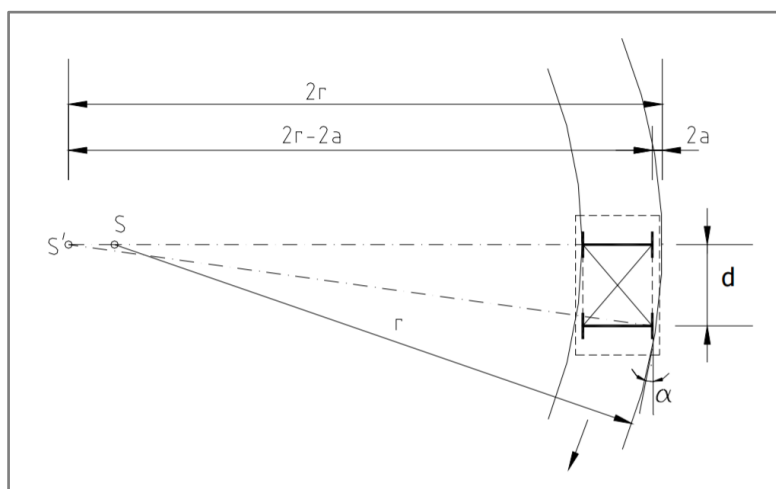
Úhel náběhu disku

Úhel náběhu disku je volen tak, aby reflektoval současnou situaci na reálných traťových obloucích. Většina vozů kolejové dopravy s výjimkou nejmodernějších vysokorychlostních vlaků je osazena několika podvozky obsahujícími většinou dvě fixně umístěné nápravy s pevným rozvorem a bez možnosti vzájemného natáčení těchto náprav. Průjezd traťovým obloukem u těchto podvozků probíhá většinou tak, že kola zadní nevodící nápravy jsou zarovnána s kolejnicovými pásy tečně, zatímco přední náprava je vodící a u jejích kol dochází k tzv. úhlu náběhu α (obr. 27) [35]. Tento efekt je nejvýraznější v malých traťových obloucích a tramvajových točnách. Jako typický příklad lze uvést např. městskou hromadnou dopravu v Brně, kde tramvajové točny dosahují poloměru i kolem 20 m. Pomocí vztahu (23). Lze pro tento případ následně stanovit úhel náběhu kol. Za předpokladu, že rozvor náprav na jednom podvozku dosahuje u většiny tramvají Dopravního podniku města Brna hodnoty 1900 mm [39-42], činí tento úhel náběhu $5,45^\circ$. Rozmezí úhlu náběhu disku $0-10^\circ$, které experimentální aparatura umožňuje, by mělo s rezervou pokrýt i ty nejhorší situace, které mohou v reálných podmínkách nastat.

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{d}{r}\right) \quad (23)$$

kde:

α	[°]	Úhel náběhu kola vodící nápravy
d	[m]	Rozvor náprav vozu nebo náprav jednotlivých podvozků
r	[m]	Poloměr zakřivení vnější kolejnice



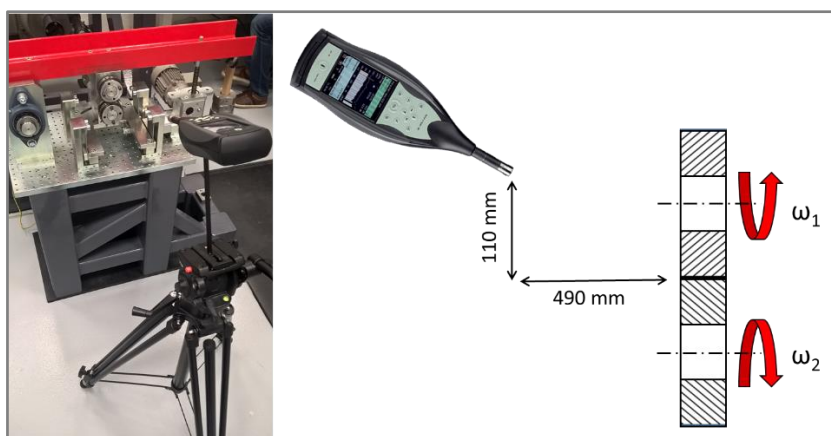
Obr. 27 Úhel náběhu kol do traťového oblouku [35]

3.1.3 Hlukoměr

3.1.3

Požadavkem provozovatele trati, na které bude vybraný modifikátor v budoucnu nasazen, není jen optimalizace adheze a snížení opotřebení, ale také snížení hladiny hlukové emise. Z toho důvodu je nutné ověřit schopnost modifikátoru *Lubcon Sintono Terra HLK* efektivně redukovat hladinu hlukové emise při průjezdu traťovým obloukem. K tomuto účelu je využit hlukoměr Brüel & Kjær typu 2250-S. Postavení hlukoměru vůči kontaktu disků v průběhu všech experimentů tohoto typu lze pozorovat na obr. 28. Cílem těchto experimentů není získat absolutní hodnotu

akustického tlaku, který vychází z kontaktu disků, ale prokázat pozitivní vliv modifikátoru tření na její redukci. Konkrétně je sledován vliv úhlu náběhu kola do traťového oblouku a vliv aplikovaného množství modifikátoru tření na adhezi a hlukovou emisi. V souvislosti s touto problematikou jsou provedeny dva experimenty. V prvním z nich je simulován úhel náběhu $0-8^\circ$, a to jak za suchého kontaktu, tak s aplikací $1\ \mu\text{l}$ modifikátoru tření. Ostatní kontaktní podmínky jsou $0,8\ \text{GPa}$, $1\ \text{m/s}$, 8% skluz. Délka jednoho experimentu odpovídá přibližně $10\ \text{s}$, během kterých jsou pozorovány 3 parametry. Jedná se o L_{Aeq} (průměrovaná hladina akustického tlaku za celý experiment), L_{Amin} (minimální hodnota akustického tlaku za celý experiment) a L_{Amax} (maximální hodnota akustického tlaku za celý experiment). Všechna měření jsou vážena akustickým váhovým fyziologickým filtrem A. Ve druhém experimentu je naopak zvolen jeden úhel náběhu (4°). Pro tento úhel je sledován vývoj hladiny akustického tlaku v čase v závislosti na aplikovaném množství modifikátoru tření ($1; 2; 3$ a $4\ \mu\text{l}$).



Obr. 28 Pozice hlukoměru během experimentů

3.2 Materiály

3.2.1 Kontaktní tělesa

Základem dvoudiskového zařízení jsou vždy dva po sobě se odvalující disky. Jeden z disků této konfigurace simuluje kolo kolejového vozidla a druhý nekonečně dlouhou kolejnici. Z toho důvodu je důležité při návrhu kontaktních těles zvážit i volbu vhodného materiálu, jenž by měl svými vlastnostmi co nejlépe odpovídat reálné kolejnici a kolu kolejového vozidla. S přihlédnutím k normě ČSN EN 13 262+A2 [36] a normě ČSN 13 674-2+A1 [37], které popisují chemické složení a mechanické vlastnosti materiálů běžně používaných k výrobě kol a kolejnic, byl pro výrobu kontaktních těles vybrán materiál 12 050, jakožto nejlepší alternativa reálně používaných materiálů. Za účelem dosažení podobných mechanických vlastností kontaktních těles bylo nutné je zakalit v celém objemu, a to na hodnoty $245\ \text{HB}$ (disk simulující kolo) a $300\ \text{HB}$ (disk simulující kolejnici). Počáteční drsnosti povrchů obou disků je $R_a = 0,4\ \mu\text{m}$.

Původní konfigurace styčných těles byla navržena k simulaci liniového kontaktu. K tomuto účelu sloužily dva disky o průměru $80\ \text{mm}$ a šířce $8\ \text{mm}$ vyrobené z výše uvedeného materiálu. Disky byly vyrobeny v měřítku $1:12$ vůči reálnému

železničnímu kolu. Jak se následně ukáže, tato konfigurace vykazovala dva zásadní problémy. Konstrukce dvoudiskového zařízení neumožňuje dokonalé nastavení liniového kontaktu styčných těles. Z toho důvodu docházelo v průběhu experimentů k výrazným hranovým efektům, což mělo za následek nadměrné a nerovnoměrné opotřebení disků. Druhým z problémů bylo nadměrné opotřebení po celém obvodu disků, a to v podobě odlupujících se šupin. Toto opotřebení bylo pravděpodobně způsobeno nízkou smykovou pevností zvoleného materiálu v kombinaci se zvolenou tepelnou úpravou.

Jako řešení obou uvedených problémů bylo navrženo disků o průměrech 80 mm a šířce 8 mm, přičemž jeden z disků byl vyroben s rádiusem o velikosti 50 mm. Tato konfigurace disků tedy simuluje bodový kontakt, což eliminuje hranové efekty vznikající u konfigurace s liniovým kontaktem. Jako materiál pro tento pár disků byla vybrána ložisková ocel 14 209. Tvrdost těchto disků je 630 HB a počáteční hodnota drsnosti $R_a = 0,2$. Rozměry finálních kontaktních těles a jejich specifikaci lze pozorovat v tab.4.

Jak uvádí Lewis [43], kontakt kola a kolejnice probíhá zejména prostřednictvím tzv. třetího tělesa neboli třecí vrstvy. Adheze v kontaktu je následně přímo ovlivněna touto vrstvou, resp. jejím složením. Bylo prokázáno, že ačkoliv může mít změna materiálu vliv na výsledky, je to hlavně teplota a vlhkost, na kterých jsou adheze v kontaktu a složení třecí vrstvy extrémně závislé.

Tab. 4 Srovnání vlastností kontaktních těles [35-37]

Těleso		Rozměr [mm]	Tvrdost [HB]	Materiál
Twin-disc	disk (kolejnice)	Ø80	630	14 209
	disk (kolo)	Ø80	630	14 209
Reálná kolejnice		-	280-300	UIC 900A
Reálné kolo		-	245	R7T

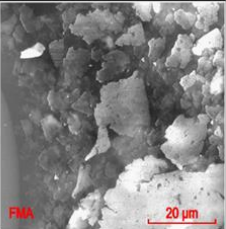
3.2.2 Modifikátor tření

Modifikátorem studovaným v této práci je produkt Sintono Terra HLK od společnosti Lubcon. Jedná se o viskózní modifikátor šedé až stříbrné barvy spadající do skupiny HPF modifikátorů. Jeho hustota činí 1150 kg/m^3 . Je založen na olejové bázi a obsahuje částice kovu (hliníku a zinku) o velikostech, jejichž rozbor lze pozorovat na obr. 29. Výrobce uvádí, že se tento produkt vyznačuje vysokou voděodolností a skvělými adhezními vlastnostmi. Je určen pro celoroční použití a odolává rozsáhlé škále teplot. Lze jej aplikovat rozprašováním pomocí spreje i za limitní teploty -25°C . Poskytuje vysokou ochranu styčných povrchů proti opotřebení a jeho mechanismům jako je např. pitting. Je vhodný pro modifikaci tření jak na hlavě kolejnice, tak na okolku. V neposlední řadě výrazně redukuje hlukovou emisi vznikající např. při průjezdu soupravy traťovým obloukem. [11, 37]

Jak bylo zjištěno v práci Galase [11] (kde byl testován i modifikátor Sintono Terra HLK, a to pod označením FMA), modifikátory na olejové bázi jsou při správném dávkování schopné velmi dobře řídit adhezi v kontaktu, aniž by nějak razantně ovlivnily schopnost akcelerace či brzdění. Byl také prokázán fakt, že adheze při použití modifikátoru tohoto typu je extrémně závislá na aplikovaném množství a v případě

nadměrné dávky modifikátoru lze dosáhnout přemazání kontaktu a poklesu součinitele adheze pod kritickou úroveň.

Pro porovnání daného modifikátoru s jinými produkty, případně posouzení, jaký dopad by mohla mít záměna modifikátoru v aplikačním systému navrženém primárně pro modifikátor *Lubcon Sintono Terra HLK*, jsou vybrány další tři modifikátory. Jedná se o dva komerční modifikátory na olejové bázi a jeden komerční modifikátor na vodní bázi. Tyto modifikátory jsou v této práci uvedeny pod označením FM1, FM2 (olejové) a FM3 (vodní).

Particle size (μm)	Number of particles per 1 ml	
4–10	145,915,182	
10–20	12,171,798	
20–30	888,070	
30–40	69,201	
40–50	5299	
60–70	474	
70–80	40	
> 80	0	

Obr. 29 Rozbor částic modifikátoru Sintono Terra HLK [11]

3.2.3 Kontaminační materiál

Z důvodu simulace co nejrealističtějších kontaktních podmínek kola a kolejničky je nutné zohlednit i nejběžnější se vyskytující kontaminanty tratě. Mezi takovéto kontaminanty se řadí voda a listí.

Listí

Listí patří mezi nejčastější kontaminanty tratí. Většina autorů zainteresovaných do této problematiky se shodla, že listí je nejnebezpečnějším kontaminantem tratí kolejových vozidel. Z tohoto důvodu je kladen velký důraz na přípravu kontaminačního materiálu.

Pro přípravu kontaminačního materiálu je sesbíráno podzimní spadené listí různé míry seschnutí. Jsou sbírány listy různého původu (buk, dub, javor, jilm atd.). Listí je nasekáno na kousky o velikosti cca. 5 mm a ty jsou následně naloženy na pět dnů v pitné vodě v poměru 1 g listí na 16 ml vody. Po pěti dnech je listí scezeno, čímž je získán lehce viskózní extrakt hnědé barvy a kousky samotných listů. Listový extrakt je oddělen z důvodu snadnější aplikace, stabilnějších podmínek v průběhu celého experimentu a z důvodu minimalizace opotřebení během studia vlivu modifikátoru na kontakt kontaminovaný listovým extraktem. Takto získaný kontaminační materiál (obr. 30) je následně zmrazen pro další použití v průběhu celé práce.



Obr. 30 Příprava listového extraktu

Voda

Voda je ze všech ten nejčastěji se vyskytující kontaminant. Z rešeršní studie vyplývá, že je voda schopna snížit součinitel adheze až pod hodnotu 0,2. Během těchto experimentů je do kontaktu kontinuálně aplikována pitná voda o pokojové teplotě (20-23 °C) v takovém množství, aby byly simulovány podmínky silného deště a kontakt byl trvale zaplaven. Množství vyhovující těmto podmínkám bylo stanoveno na 3 ml/min.

3.3 Průběh experimentů

3.3

Před každým experimentem v této práci jsou disky očištěny, odmaštěny a proveden jejich záběh za podmínek: 0,8 GPa, 1 m/s a 8% skluz. Záběh je ukončen, jakmile se adheze ustálí (při těchto podmínkách na hodnotě okolo 0,6). Poté jsou přenastaveny kontaktní podmínky dvoudiskového zařízení a proveden příslušný experiment. Nebude-li v kapitole 4 u daných experimentů uvedeno jinak, jsou tyto experimenty provedeny pro základní nastavení kontaktních parametrů, tj. kontaktní tlak 0,8 GPa, rychlost 1 m/s, 8% skluz a úhel náběhu 0°. Podrobný seznam většiny experimentů a nastavení jejich provozních parametrů lze vidět v příloze č.1.

3.3.1 Průběh verifikačních experimentů

3.3.1

Verifikační experimenty sledující vliv provozních parametrů v suchém kontaktu jsou provedeny při pokojové teplotě a za podmínek: rychlost 0,5-2 m/s, zatížení 0,6-1 GPa, skluz 1-8 %, úhel náběhu disku 0-10°. Tyto experimenty jsou provedeny dle následujícího postupu:

- Očištění disků
- Záběh disků za výše uvedených podmínek
- Setření záběhového otěru
- Nastavení provozních parametrů dvoudiskového zařízení
- Spuštění příslušného experimentu

3.3.2 Průběh experimentů s modifikátorem

3.3.2

Stanovení skutečného množství modifikátoru v kontaktu

Po aplikaci modifikátoru a jeho průchodu kontaktem dochází k výtlačku určitého množství mimo tento kontakt. Určení skutečného množství modifikátoru tření, které setrvává v kontaktu a podílí se na tvorbě třecí vrstvy, je provedeno jednoduchým

experimentem. Po obvodu disku je aplikován postupně 4x1 μ l modifikátoru. Následně je provedena 1 otáčka disků v kontaktu, čímž je vytlačen přebytečný modifikátor z každého aplikačního místa. Vytlačený modifikátor mimo kontakt je následně sejmuto ostrým břitem a zvážen na vysoce přesné analytické laboratorní váze Kern ABS-N/ABJ-NM (obr. 31). Zjištěná hmotnost je následně porovnána s hmotností samotných 4 μ l modifikátoru a vyhodnocen výtlač. Postup je z důvodu větší přesnosti několikrát opakován.

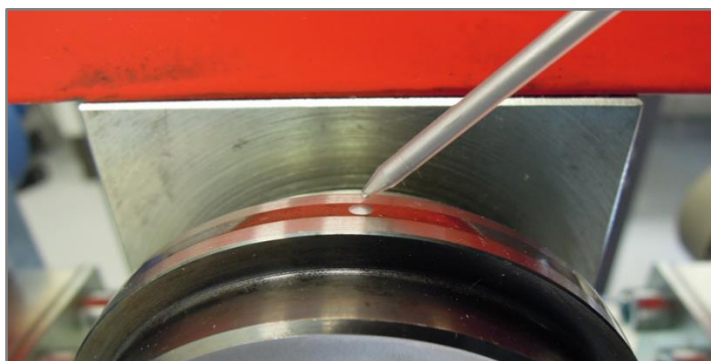


Obr. 31 Laboratorní váha Kern [48]

Průběh experimentů s modifikátorem

V případě experimentů s modifikátorem byl před spuštěním samotného experimentu na jeden z disků aplikován modifikátor v daném množství za pomoci mikropipety (obr. 32). U experimentu vlivu kontaminantů byla voda o pokojové teplotě do kontaktu aplikována kontinuálně za pomoci laboratorní pipety v množství 3 ml/min tak, aby byly simulovány podmínky silného deště. U experimentů vlivu listového extraktu byl před zahájením samotného experimentu aplikován na jeden z disků modifikátor. V reálných podmínkách by pravděpodobně došlo nejdříve ke kontaminaci listím a následně na to aplikaci modifikátoru tření. V této práci předem připravený kontaminant v podobě listového extraktu ovšem není tak viskózní, jak jej ve své práci popisuje Machatka [3] a po jeho aplikaci stéká z disků dříve, než je zahájen experiment. Z toho důvodu je extrakt aplikován do kontaktu přímo mezi disky, a to až po aplikaci modifikátoru a spuštění experimentu. Listový extrakt je aplikován injekční jehlou v množství 0,5 ml. Většina experimentů se samotným modifikátorem je ukončena, jakmile dosáhne součinitel adheze v kontaktu hodnoty 0,4, jelikož už lze tuto hodnotu považovat za suché tření. Experimenty vlivu modifikátoru na hlukovou emisi probíhají stejným způsobem, ale za přítomnosti hlukoměru. Kontaktní parametry verifikačních experimentů jsou: rychlost 0,5-2 m/s, zatížení 0,6-1 GPa, skluz 1-8 %, úhel náběhu disku 0-10°, množství modifikátoru 0-6 μ l. Veškeré experimenty s modifikátorem jsou provedeny dle následujícího postupu:

- Očištění disků
- Záběh disků za výše uvedených podmínek
- Setření záběhového otěru
- Nastavení provozních parametrů dvoudiskového zařízení, aplikace modifikátoru
- Spuštění příslušného experimentu, aplikace kontaminantů (voda, listový extrakt)



Obr. 32 Způsob aplikace modifikátoru tření

3.3.3 Vyhodnocení experimentů

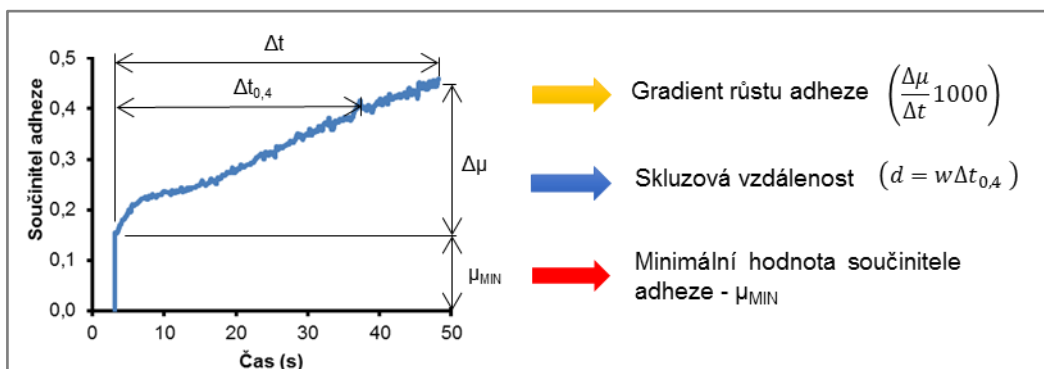
3.3.3

Získaná data většiny experimentů jsou filtrována a následně zpracována ve formě křivek znázorňujících průběh součinitele adheze v čase (např. obr. 42a). Výjimku v tomto případě tvoří série experimentů sledujících vliv skluzové rychlosti a množství modifikátoru tření na vývoj adheze v kontaktu.

Pro komplexní analýzu vlivu aplikovaného množství modifikátoru a skluzové rychlosti na vývoj adheze v kontaktu je provedena série 64 experimentů. Je vytvořeno 16 různých skluzových rychlostí (16 kombinací různých skluzů a rychlostí), následně pro každou z nich aplikováno množství 1, 2, 4 a 6 μl modifikátoru a proveden experiment. Na sérii těchto experimentů je pozorována celá řada parametrů. Typický příklad průběhu jednoho z experimentů a jeho zpracování lze pozorovat na obr. 33. Na tomto experimentu je sledován(a):

- **minimální hodnota součinitele adheze** po aplikaci daného množství modifikátoru. Je tedy zaznamenána nejnižší hranice, od které se adheze vyvíjí již pouze ve směru vyšších hodnot.
- **gradient růstu adheze**, který představuje obnovu adheze v kontaktu s modifikátorem. Tento gradient je získán jako podíl $\Delta\mu/\Delta t$, a to v rozmezí od minimální hodnoty součinitele adheze μ_{MIN} až po konec experimentu, který se pohyboval v hodnotách suchého tření (0,4-0,6). Tento podíl je z důvodu přehlednějšího zpracování vynásoben číslem 10^3 . Gradient růstu adheze udává rychlost, s jakou za daných podmínek roste součinitel adheze.
- **životnost vytvořené vrstvy modifikátoru tření**. Životnost této vrstvy je vyhodnocena z pohledu uražené skluzové vzdálenosti, a to od počátku experimentu do okamžiku dosažení suchého tření (0,4). Skluzová vzdálenost je vyjádřena jako součin dané skluzové rychlosti a daného časového intervalu (v tomto případě $\Delta t_{0,4}$). Po aplikaci daného množství modifikátoru a spuštění experimentu je zaznamenávána hodnota intervalu $t_{0,4}$. Po vynásobení hodnoty $t_{0,4}$ a příslušné skluzové rychlosti je získána skluzová vzdálenost. Takto získané skluzové vzdálenosti pro dané množství modifikátoru jsou následně zprůměrovány. Tím je získána skluzová vzdálenost, kterou je třecí vrstva vytvořená daným množstvím modifikátoru schopná absolvovat, než dojde opět k suchému tření. Tímto postupem jsou získány skluzové vzdálenosti pro třecí

vrstvy vytvořené aplikací 1, 2, 4 a 6 μl modifikátoru, resp. je získána jejich průměrná životnost.



Obr. 33 Výsledek experimentu a způsob jeho zpracování

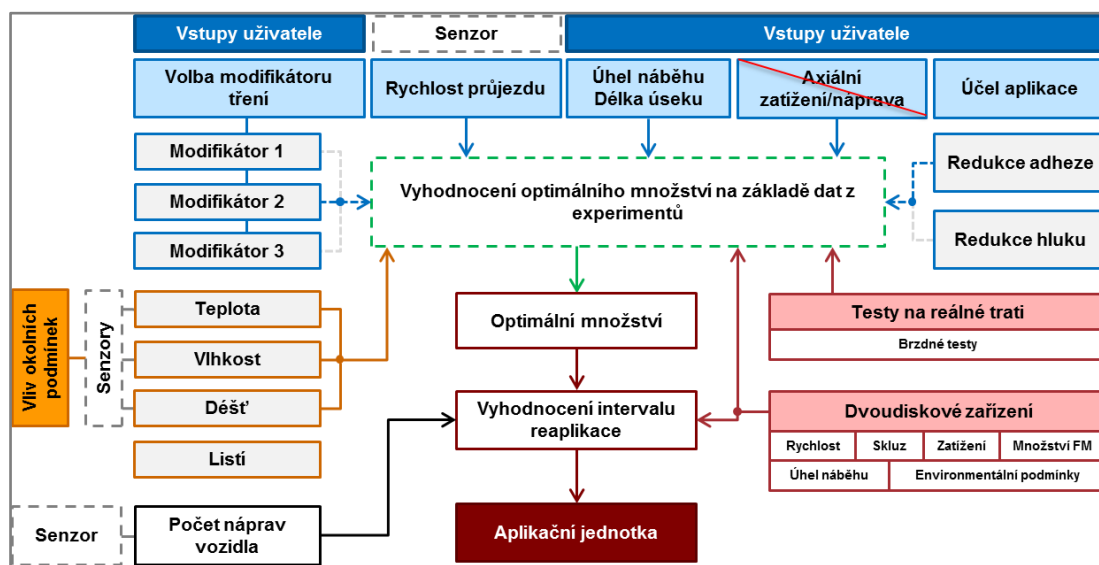
4 VÝSLEDKY

4

4.1

4.1 Návrh řízení off-board jednotky

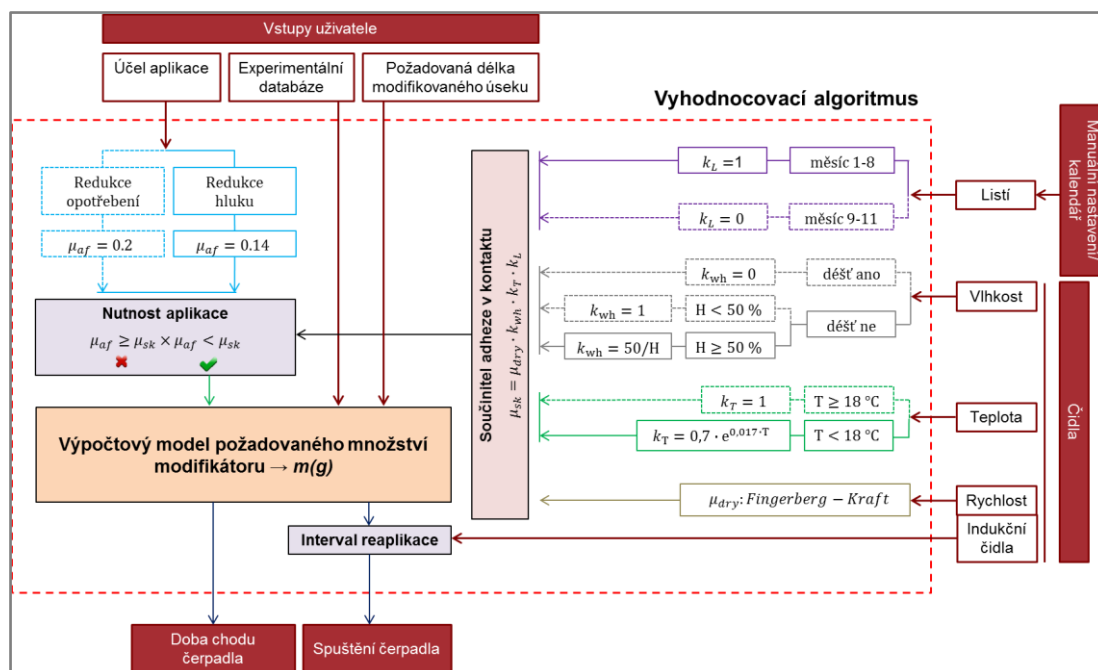
Na obr. 34 je vytvořeno obecné schéma reálné aplikační jednotky a principu jejího fungování. Jelikož se jedná o aplikační jednotku s aktivním řídicím systémem, je nutné do tohoto systému dodávat v reálném čase informace o aktuálních kontaktních podmínkách na trati. K tomuto účelu by měla být využita nejrozličnější čidla a senzory monitorující okolní klimatické podmínky, jako jsou teplota, vzdušná vlhkost nebo výskyt deště. Kromě klimatických podmínek je nutné pozorovat i provozní parametry. Pomocí indukčních případně jiných senzorů je sledována nejen aktuální rychlost vozidla, ale i počet projetých náprav. Informace o počtu projetých náprav je pro vyhodnocovací algoritmus důležitá z důvodu určení reapikačního intervalu. Mezi provozní parametry se obecně řadí i skluz a zatížení. Jak ale vyplývá z grafu na obr. 40, je dokázáno, že zatížení má na změny adheze zanedbatelný vliv. Z toho důvodu je zatížení zanedbáváno i v tomto řídicím systému. Skluz má oproti zatížení mnohem výraznější vliv, avšak současná kolejová vozidla dopravního podniku, kde bude tento systém v budoucnu nasazen, nejsou vybavena technologií, která by dokázala aktuální skluz monitorovat. Z toho důvodu je nutné zadávat do řídicího systému průměrnou hodnotu skluzu manuálně. S informacemi o aktuálních provozních podmínkách a za pomoci databáze experimentálně získaných výsledků na dvoudiskovém zařízení a reálné trati je tento systém již schopný vyhodnotit aktuální adhezi v kontaktu. Požadovaná adheze v kontaktu se odvíjí od účelu aplikace, který je nutné nastavit manuálně v závislosti na poloze využití dané aplikační jednotky. Systém je navržen konkrétně pro dva účely, a to buď za účelem optimalizace adheze a snížení opotřebení nebo za účelem snížení hlukové emise. Ačkoliv je tento systém navržen pouze pro jeden modifikátor, lze ho v budoucnu obohatit o další modifikátory, které by mohly být vhodnější např. pro různé specifické kontaktní podmínky, jako v případě deště apod. V tomto případě by bylo pouze nutné stejným způsobem získat experimentální data pro vybrané modifikátory tření.



Obr. 34 Schéma řídicího systému off-board jednotky

Na obr. 35 lze pozorovat schematické znázornění a princip funkce samotného vyhodnocovacího algoritmu. Tento algoritmus lze rozdělit na dvě základní části. Prává polovina schématu určuje aktuální součinitel adheze, přičemž vychází se vztahu predikujícího hodnotu součinitele adheze pro suché tření, a to v závislosti na aktuální rychlosti a skluzu. Jako nejvhodnější varianta pro tento účel byl vybrán Fingerberg-Kraftův vztah (8-10). Aktuální rychlost vozidla je snímána indukčními čidly. Jak bylo zmíněno výše, aktuální skluz kolejového vozidla je nutné predikovat a následně zadávat manuálně. Podle Laty [47], se skluz kolejového vozidla v reálných podmínkách pohybuje většinou v rozmezí několika desetin až tří procent. Jelikož v traťovém oblouku, kde jsou projevy opotřebení a hluku nejvýraznější, přibývá navíc složka skluzu v příčném směru, bude pro tento systém primárně uvažována horní hranice běžného skluzu a to 3 %. Získaná hodnota součinitele adheze pro suché tření je následně upravena několika korekčními součiniteli. Uvedené korekční součinitele teploty a vzdušné vlhkosti jsou výsledkem předchozích studií Tribologické skupiny Ústavu konstruování. Detailní poznatky o vlivu teploty a vzdušné vlhkosti budou do řídicího algoritmu následně doplněny ze současně probíhající diplomové práce, která se zabývá rozsáhlou problematikou vlivu klimatických podmínek na adhezi. Z grafů na obr. 48-49 je patrné, že modifikátor Sintono Terra HLK ve vodou a listím kontaminovaném kontaktu vede ke kritickému snížení adheze. Z toho důvodu je korekční součinitel výskytu deště a korekční součinitel výskytu listí (v podzimních měsících) nastaven na nulu. Tento krok by měl v uvedených případech vyřadit aplikační jednotku z provozu.

Do levé části řídicího algoritmu patří vstupy uživatele a samotný výpočtový model. Jedním ze vstupů v této části je účel aplikace, a to redukce opotřebení nebo redukce hluku. Účel aplikace bude vždy nastaven manuálně dle požadavků na konkrétní úsek tratě. Podle tab. 1 jsou stanoveny požadované součinitele adheze. Pro redukci hluku to znamená hodnotu 0,14, což by mělo snížit adhezi na maximální možnou úroveň a současně zajistit schopnost brzdění. Pro redukci opotřebení byla stanovena optimální úroveň adheze a to 0,2. Hodnoty aktuálního a požadovaného součinitele adheze jsou následně porovnány a je rozhodnuto o nutnosti aplikace modifikátoru. Tato informace následně vstupuje do výpočtového modelu. Do výpočtového modelu vstupuje také databáze experimentálně získaných dat a informace o požadované délce modifikovaného úseku. Požadovaná délka je do systému opět zadávána manuálně uživatelem. Výpočtový model následně určí požadované množství modifikátoru, životnost této vrstvy modifikátoru a za pomoci indukčních čidel a informací o počtu projetých náprav interval reapplikace daného množství modifikátoru.



Obr. 35 Vyhodnocovací algoritmus off-board jednotky

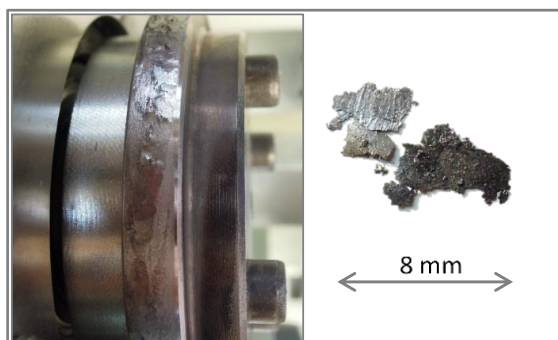
4.2 Verifikační experimenty

4.2

4.2.1 Vliv částic opotřebení na výsledky experimentů

4.2.1

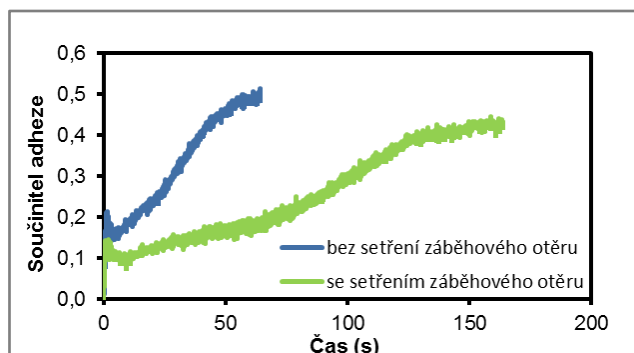
Po sestavení měřicí aparatury byla provedena sada verifikačních experimentů. Již při těchto testech bylo na discích patrné výrazné opotřebení ve formě drobných šupin odlupujících se z povrchu disků (obr. 36). Disky byly vyrobeny z výše uvedeného materiálu (ocel 12050), který je podobný materiálům skutečného kola a kolejnice. Také tvrdosti povrchů disků byly odpovídající reálným podmínkám. I přes tyto skutečnosti měl zřejmě povrch použitých disků nízkou pevnost ve smyku, což způsobovalo oddělování tenkých šupin z jejich povrchů.



Obr. 36 Opotřebení disk

Pro posouzení, jaký vliv mají částice opotřebení na průběh adheze v kontaktu s modifikátorem tření, byly provedeny experimenty, jejichž výsledky lze pozorovat na obr. 37. V prvním experimentu byl proveden záběh, následně aplikován 1 μ l modifikátoru a poté proveden test při podmínkách 1 m/s, 8% skluz, 0,8 GPa. V druhém, experimentu byl proveden záběh, disky následně zbaveny záběhového

otěru, poté byl aplikován 1 μ l modifikátoru a následně proveden totožný test - 1 m/s, 8 % skluz, 0,8 GPa.

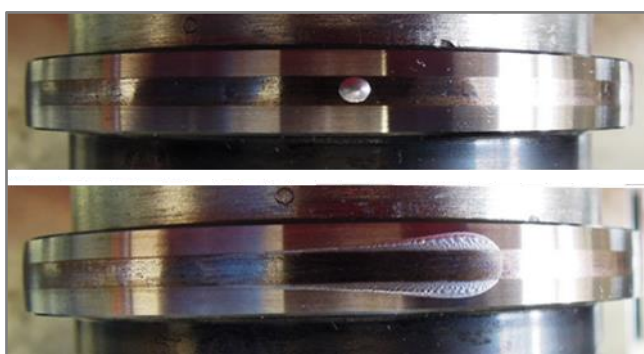


Obr. 37 Vliv záběhového otěru

Z výsledků na obr. 37 vyplývá, že záběhový otěr, případně otěr vznikající v průběhu testu, má výrazný vliv na průběh adheze v kontaktu a to tak, že napomáhá obnově adheze v kontaktu. Výsledky experimentů provedených s těmito disky lze tedy považovat za zkreslené. Z toho důvodu bylo nutné přistoupit k výrobě a použití nové sady disků vyrobených z ložiskové oceli, tak jak je uvedeno v kapitole 3.2.

4.2.2 Určení skutečného množství modifikátoru tření v kontaktu

Po aplikaci modifikátoru a jeho průchodu kontaktem je zřejmé, že dochází k výtlačku značného množství mimo tento kontakt (obr. 38). Průměrný výtlač činí 73,9 %, což znamená, že v kontaktu setrvává pouhých 26,1 % z aplikovaného množství. Ve zbytku práce je vždy uváděno množství aplikované, nikoliv skutečné množství modifikátoru, které setrvává v kontaktu. Na obr. 38 je dále vidět, že po několika zábězích a experimentech se na discích v místě kontaktu vytvořila drážka opotřebení. Šířka této drážky činila 2 mm a v průběhu práce se již neměnila. V konečném důsledku to znamená, že nebyl simulován bodový, ale liniový kontakt. Kontaktní tlak je v celé práci nastavován s ohledem na tuto drážku a skutečnou geometrii disků.



Obr. 38 aplikace a výtlač modifikátoru tření

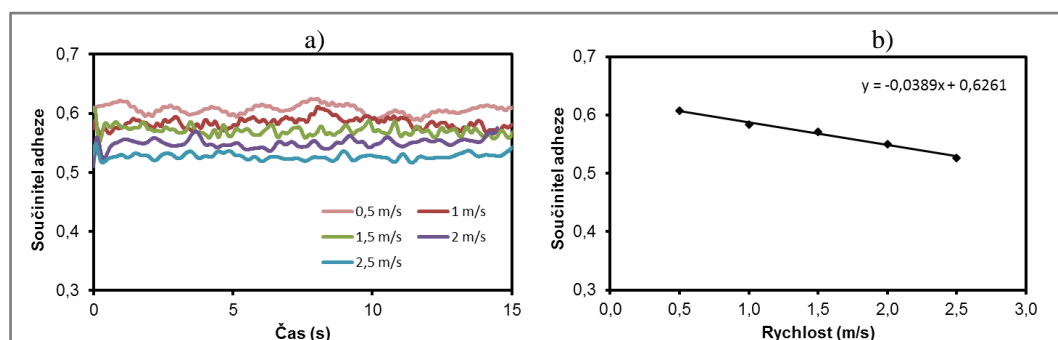
4.2.3 Verifikační experimenty

V této kapitole je provedena řada verifikačních experimentů, které slouží jak k ověření funkčnosti sestaveného experimentálního dvoudiskového zařízení, tak k získání vlivu jednotlivých provozních parametrů na vývoj adheze v kontaktu kola a kolejnice. Mezi

provedené verifikační experimenty patří vliv rychlosti, vliv skluzu, vliv zatížení a simulace vlivu úhlu náběhu kola do traťového oblouku. Detailní kontaktní podmínky jsou uvedeny u každého experimentu zvlášť.

Vliv rychlosti

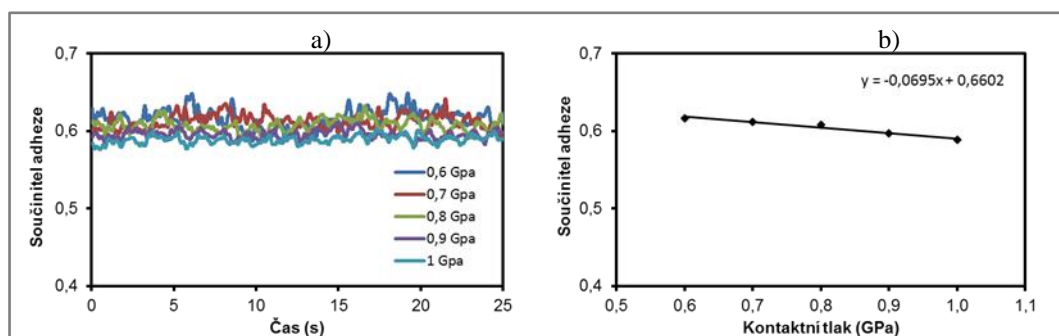
V tomto experimentu, jehož výsledky lze pozorovat na obr. 39a, je sledován vliv rychlosti na hodnotu adheze v kontaktu disků, a to v rozmezí 0-2,5 m/s. Z výsledků vyplývá, že při změnách rychlosti, která se pohybovala v maximálním možném rozsahu, dochází k poklesu adheze. Z průměrných hodnot adheze pro jednotlivé rychlosti je sestavena závislost adheze na změně rychlosti (obr. 39b). Z této závislosti vyplývá, že adheze klesá s rostoucí rychlostí, a to téměř lineárně. Stejného trendu dosáhly i publikace [7, 9, 14-16].



Obr. 39 a) Výsledky experimentu vlivu rychlosti na adhezi, b) Závislost adheze na změně rychlosti

Vliv zatížení

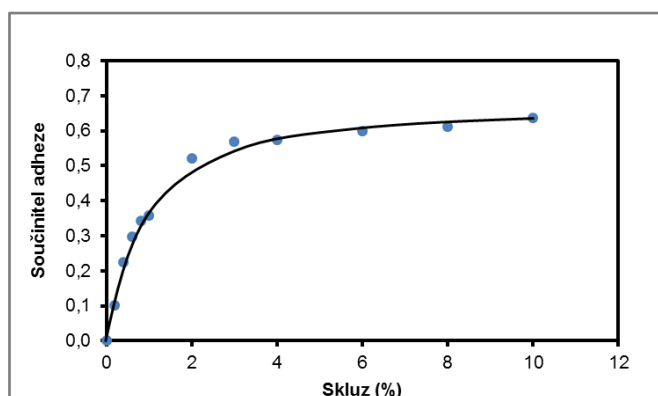
V tomto experimentu je sledován vliv zatížení v suchém nekontaminovaném kontaktu. Zatížení se pohybuje v rozmezí od 0,6 GPa do 1 GPa, což i s rezervou pokrývá většinu kontaktních tlaků v tramvajové dopravě. Výsledky experimentu lze pozorovat na obr.40. Při vzrůstu zatížení z 0,6 GPa na 1 GPa, dochází k poklesu adheze o hodnotu pouhých 0,03. Zatížení má tedy podle výsledků zanedbatelný vliv, což je i v souladu s výsledky uvedenými v publikacích [9,14-16]. Pro aktivní řídicí systém reálné aplikační jednotky to znamená zanedbání tohoto provozního parametru při řízení adheze v kontaktu.



Obr. 40 a) Výsledky experimentu vlivu zatížení na adhezi, b) Závislost adheze na zatížení

Vliv skluzu

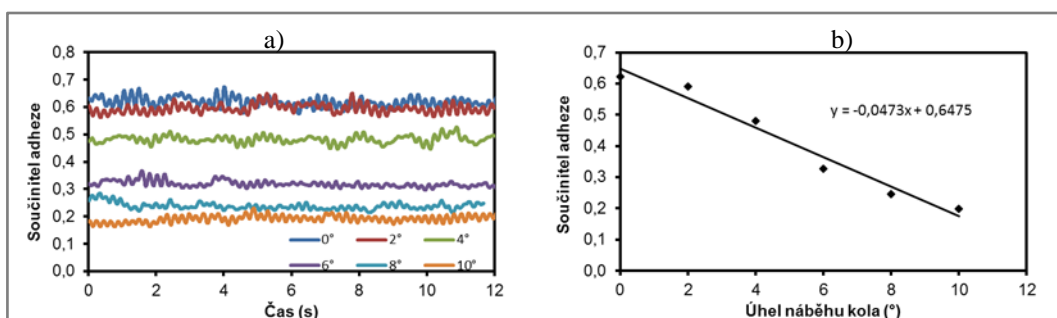
V tomto experimentu je sledován vliv skluzu na hodnotu adheze v kontaktu disků, a to v rozmezí 0-10 %. Z výsledků byla sestavena trakční křivka (obr. 41), která vykazuje pozitivní charakter. Galas [11] uvádí, že na zařízení MTM je velmi obtížné simulovat negativní charakter trakční křivky, což byl také jeden z důvodů výběru dvoudiskového zařízení pro tuto práci. Tímto experimentem byla ovšem vyvrácena schopnost simulace negativního trendu trakční křivky i u dvoudiskového zařízení.



Obr. 41 Trakční křivka

Vliv úhlu náběhu

V tomto experimentu, jehož výsledky lze pozorovat na obr. 42a, je sledován vliv úhlu náběhu jednoho z disků na hodnotu adheze v kontaktu disků. Je simulován úhel náběhu 0, 2, 4, 6, 8 a 10°. Bylo prokázáno, že úhel náběhu má na adhezi poměrně výrazný vliv. Při vzrůstu úhlu náběhu z 0° na 10° dochází k postupnému snížení adheze v tečném směru z hodnoty 0,61 až na pouhých 0,2 (obr. 42b). Tento trend je opět v souladu s již publikovanými výsledky v práci [14]. Stejně tak je odpovídající i fakt, že byl rostoucí úhel náběhu doprovázen rostoucí hladinou hlukové emise.

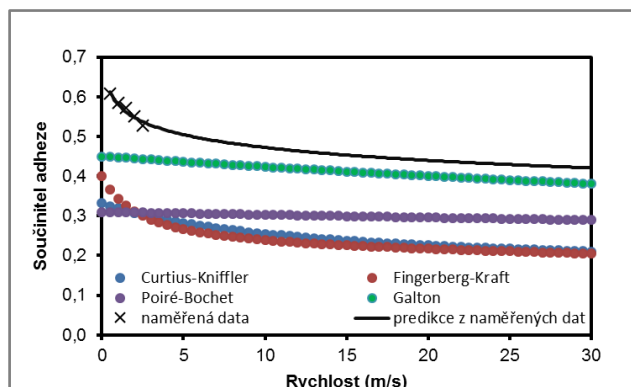


Obr. 42 a) Výsledky experimentu vlivu úhlu náběhu kola, b) Závislost adheze na úhlu náběhu kola

4.2.4 Porovnání experimentálně získaných dat s predikčními vztahy

4.2.4

Na obr. 43 jsou porovnávána experimentálně získaná data se vztahy predikujícími adhezi v závislosti na rychlosti kolejového vozidla a daném skluzu. Hodnoty statických součinitelů smykového tření, které vstupují do vybraných vztahů, jsou voleny dle autorů těchto vztahů následovně: $\mu_{\text{stat}} = 0,4$ (Fingerberg-Kraft); $\mu_{\text{stat}} = 0,31$ (Poiré/Bochet); $\mu_{\text{stat}} = 0,45$ (Galton). Uvedená experimentálně získaná data platí pro kontaktní podmínky 0,8 GPa, 8% skluz a 0,5-2,5 m/s. Jako nejlepší shoda s experimentálními daty se jeví Galtonův vztah.



Obr. 43 Porovnání experimentu s predikčními vztahy

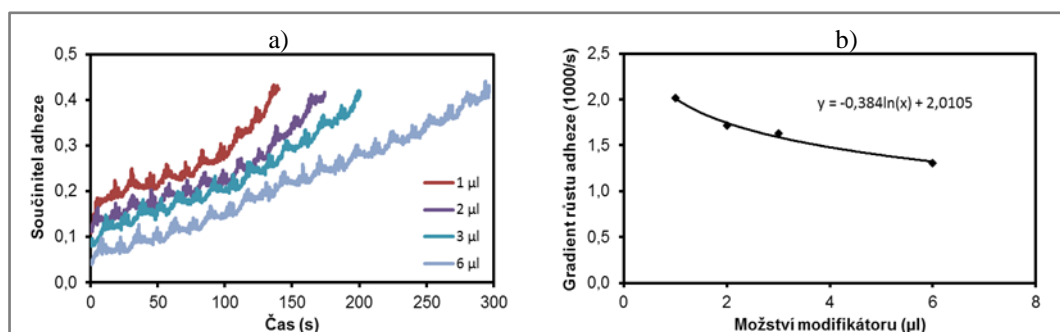
4.3 Experimenty vlivu modifikátoru tření

4.3

V této kapitole je studován vliv kontaminantů, jako je voda nebo listový extrakt, na adhezi v suchém i modifikovaném kontaktu. Je zde také studován vliv modifikátoru a jeho množství na adhezi v kontaktu při různých provozních parametrech. Příslušné kontaktní podmínky jsou uvedeny u každého experimentu zvlášť.

Vliv množství modifikátoru

V tomto experimentu, jehož výsledky lze pozorovat na obr. 44, je sledován vliv aplikovaného množství modifikátoru na vývoj adheze v kontaktu. Během těchto čtyř měření je aplikováno množství 1, 2, 3 a 6 μl . S rostoucím množstvím modifikátoru v kontaktu roste pokles adheze, a to z hodnot suchého tření (0,6) až na hodnoty nízké adheze (pod 0,1). S rostoucím množstvím modifikátoru v kontaktu se také prodlužuje doba obnovy adheze zpět na hodnoty suchého tření. Tím byla potvrzena schopnost vybraného modifikátoru poměrně efektivně řídit vývoj adheze v kontaktu v závislosti na aplikovaném množství.

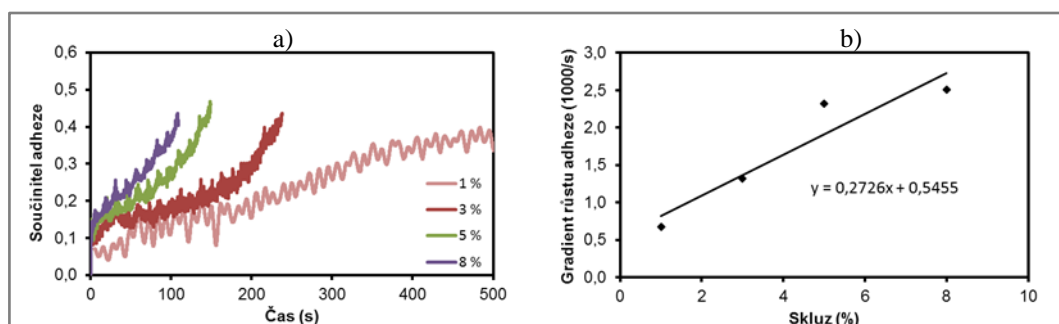


Obr. 44 a) Výsledky experimentu vlivu množství modifikátoru na adhezi, b) Závislost gradientu růstu adheze na aplikovaném množství modifikátoru

Vliv skluzu na adhezi s aplikací modifikátoru

V tomto experimentu, jehož výsledky lze pozorovat na obr. 45, je pozorován vliv skluzu na průběh adheze v kontaktu s aplikovaným modifikátorem. Experiment je proveden s aplikací 2 μl modifikátoru a při skluzu 1, 3, 5 a 8 %. Z výsledků je zřejmé, že s rostoucím skluzem roste i adheze bezprostředně po aplikaci modifikátoru a urychluje se obnova adheze v kontaktu. Zatímco v případě 8 % dochází k poklesu

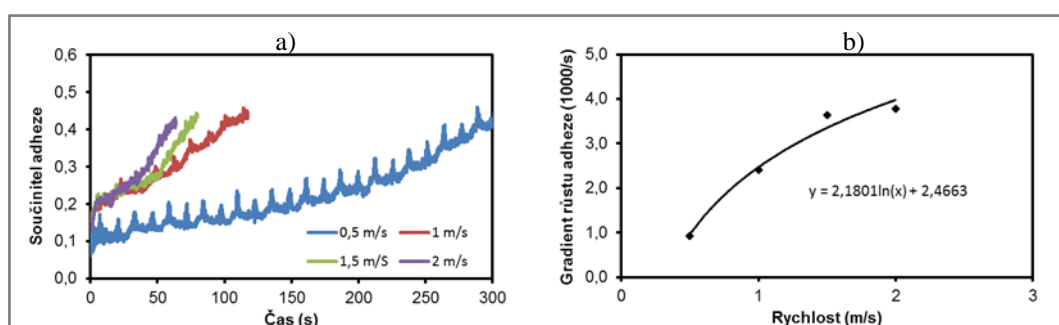
adheze k hodnotám okolo 0,15, při 1% skluzu dochází k poklesu adheze pod kritickou úroveň (pod 0,1).



Obr. 45 a) Výsledky experimentu vlivu skluzu s aplikací modifikátoru, b) Závislost gradientu růstu adheze na skluzu v kontaktu s modifikátorem

Vliv rychlosti na adhezi s aplikací modifikátoru

V tomto experimentu (obr. 46) je pozorován vliv rychlosti na průběh adheze v kontaktu s aplikovaným modifikátorem. Experiment je proveden pro rychlosti 0,5, 1, 1,5 a 2 m/s a s aplikací 2 μ l modifikátoru. Z výsledků je zřejmé, že s rostoucí rychlostí roste i adheze bezprostředně po aplikaci modifikátoru a urychluje se obnova adheze v kontaktu. Zatímco v případě 2 m/s byl zaznamenán pokles adheze k hodnotám v rozmezí 0,15-0,2, při rychlosti 0,5 m/s dochází k poklesu adheze na kritickou úroveň (0,1).



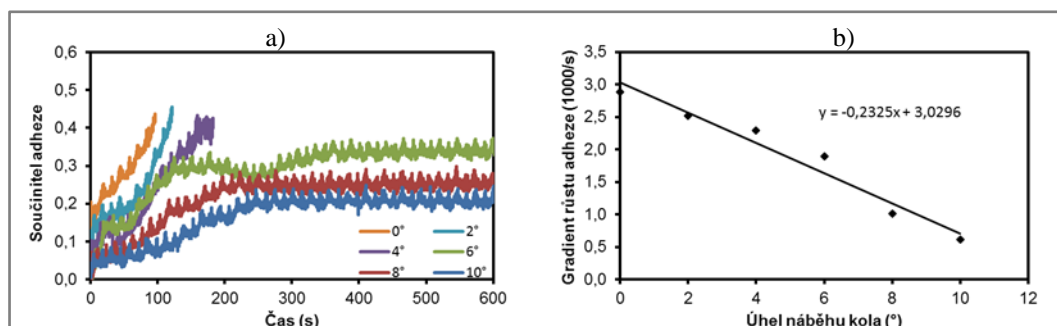
Obr. 46 a) Výsledky experimentu vlivu rychlosti s aplikací modifikátoru, b) Závislost gradientu růstu adheze na rychlosti v kontaktu s modifikátorem

Vliv úhlu náběhu na adhezi s aplikací modifikátoru

V tomto experimentu, jehož výsledky lze pozorovat na obr. 47a, je sledován vliv úhlu náběhu jednoho z disků na hodnotu adheze v kontaktu s aplikovaným modifikátorem. Experiment je proveden postupně pro úhly náběhu 0, 2, 4, 6, 8 a 10° a s aplikací 2 μ l modifikátoru.

Z výsledků je zřejmé, že po aplikaci stejného množství modifikátoru dochází k různému poklesu a vývoji adheze, a to v závislosti na aktuálních kontaktních podmínkách a úhlu náběhu. V případě 0° a 2° dochází k poklesu adheze nad úroveň nízké adheze (nad 0,1). U 4° a 6° dochází k počátečnímu poklesu adheze pod kritickou úroveň a téměř k okamžitému vývoji nad tuto hranici. Nejhorší situace pro dané množství modifikátoru nastává v případě 8° a 10°, během kterých dochází k déle trvajícím poklesu adheze (více jak 50 s) pod hodnotu nízké adheze (pod 0,1). Na obr. 47b je znázorněn gradient růstu a obnovy adheze v závislosti na různých úhlech

náběhu. Vliv úhlu náběhu na obnovu adheze v modifikátorem kontaminovaném kontaktu vykazuje téměř lineární závislost, a to tak, že s rostoucím úhlem roste i rychlost obnovy adheze na původní úroveň.

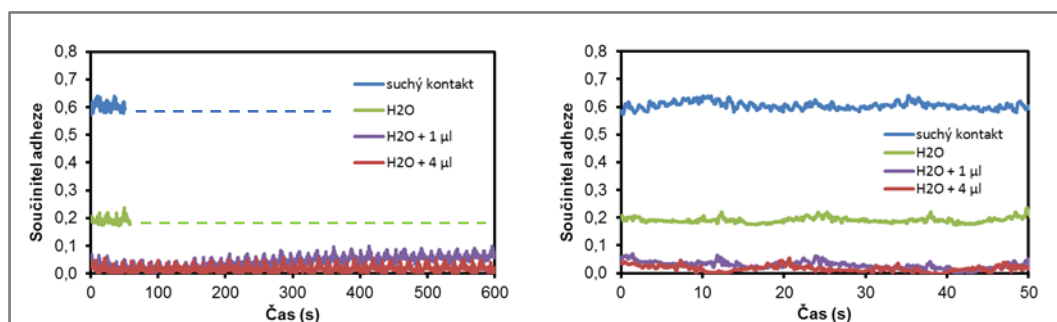


Obr. 47 a) Výsledky experimentu vlivu úhlu náběhu disku s aplikací modifikátoru, b) Vliv úhlu náběhu kola v kontaktu s modifikátorem na gradient růstu adheze

Vliv množství modifikátoru na adhezi při kontaminaci vodou

V tomto experimentu (obr. 48) je studován vliv aplikovaného množství modifikátoru na adhezi v kontaktu kontaminovaném vodou. Před každým měřením je na disky aplikováno dané množství modifikátoru, tedy 1 a 4 μl . Pro názorné srovnání jsou provedeny i experimenty daných kontaktních podmínek pro suchý kontakt a pro kontakt kontaminovaný pouze vodou.

Zatímco suchý kontakt vykazuje adhezi přibližně 0,6, tak adheze u vodou kontaminovaného kontaktu se pohybuje okolo 0,2. Po aplikaci modifikátoru, i když v množství pouhého 1 μl , dochází k výraznému a déle trvajícimu poklesu adheze až k hodnotě 0,01. S rostoucím množstvím aplikovaného modifikátoru se tento efekt prodlužuje. U aplikace 4 μl modifikátoru dochází k potlačení součinitele adheze pod kritickou úroveň (pod 0,05) po celou dobu experimentu, a navíc bez známek jakéhokoli vývoje ve směru vyšších hodnot.



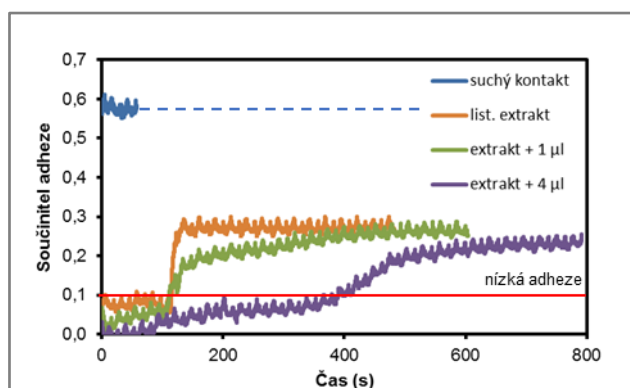
Obr. 48 Vliv množství modifikátoru na adhezi ve vodou kontaminovaném kontaktu

Vliv množství modifikátoru na adhezi při kontaminaci listovým extraktem

V tomto experimentu (obr. 49) je studován vliv aplikovaného množství modifikátoru na adhezi v kontaktu kontaminovaném listovým extraktem. Před každým měřením je na disky aplikováno dané množství modifikátoru, tedy 1 a 4 μl . Pro názorné srovnání jsou provedeny i experimenty pro suchý kontakt a pro kontakt kontaminovaný pouze listovým extraktem.

Po aplikaci listového extraktu dochází pro dané kontaktní podmínky k poklesu adheze z hodnoty 0,6 pro suchý kontakt na hodnotu přibližně 0,09.

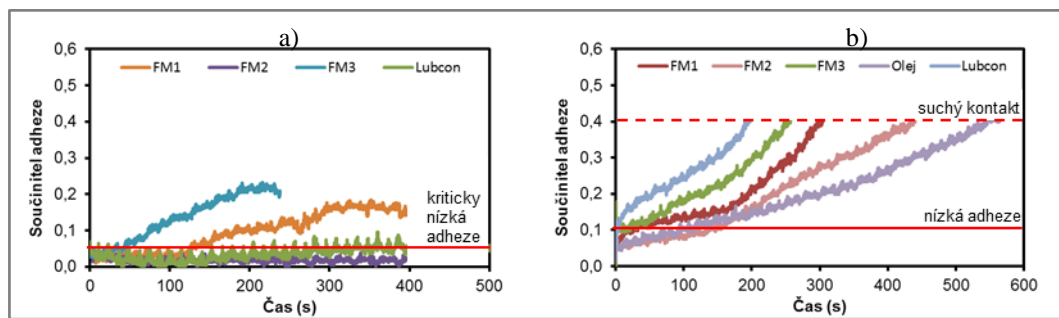
Po 110 sekundách dochází k úplnému vyprchání listového extraktu a nárůstu adheze na hodnotu mírně pod 0,3. Ačkoliv jsou v této fázi disky již kompletně suché, je jejich povrch kontaminovaný zaválcovanými mikročásticemi listů z list. extraktu natolik, že není možný další růst adheze, a to ani po opakovaném ručním čištění acetonem. Během experimentů s modifikátorem dochází bezprostředně po aplikaci 1 μl resp. 4 μl k poklesu adheze až na hodnotu 0,013 resp. 0,008. Pokles adheze a jeho trvání s rostoucím množstvím modifikátoru v listím kontaminovaném kontaktu roste.



Obr. 49 Vliv modifikátoru na list. extraktem kontaminovaný kontakt

Porovnání komerčních modifikátorů tření

V následujícím experimentu je sledován vliv několika komerčních modifikátorů na adhezi ve vodou kontaminovaném (obr. 50a) a suchém (obr. 50b) kontaktu. V obou experimentech jsou všechny komerční modifikátory aplikovány v množství 2 μl . V případě suchého kontaktu je společně s modifikátory porovnán i olej v tom samém množství.



Obr. 50 Vliv komerčních modifikátorů tření na adhezi ve: a) vodou kontaminovaném, b) suchém kontaktu

V případě kontaminace vodou dochází po aplikaci jakéhokoliv komerčního modifikátoru k poklesu adheze pod kritickou úroveň 0,05. Modifikátor od firmy Lubcon a modifikátor pod označením FM2 udržují adhezi pod touto hodnotou v průběhu téměř celého experimentu. Nejmenší citlivost na kontaminaci vodou projevuje vodní modifikátor FM3, u něhož je po přibližně 50 s zaznamenán opětovný růst adheze nad kritickou úroveň (nad 0,05). V případě experimentu se suchým kontaktem lze mezi jednotlivými experimenty pozorovat velké rozdíly v průběhu adheze. Nejmenší schopnost snižování adheze v kontaktu vykazuje modifikátor značky Lubcon. V jeho případě dochází při daných kontaktních podmínkách k dosažení suchého kontaktu po přibližně 200 s. Naopak modifikátor FM2 udržuje

sníženou adhezi ze všech modifikátorů nejdéle, a to až po dobu 450 s. U modifikátoru značky Lubcon také jako jediného dochází bezprostředně po aplikaci k poklesu adheze nad hodnotu nízké adheze tzn. nad 0,1. Všechny komerční modifikátory také prokazují nižší mazací schopnost a lepší schopnost řízení adheze v kontaktu než samotný olej.

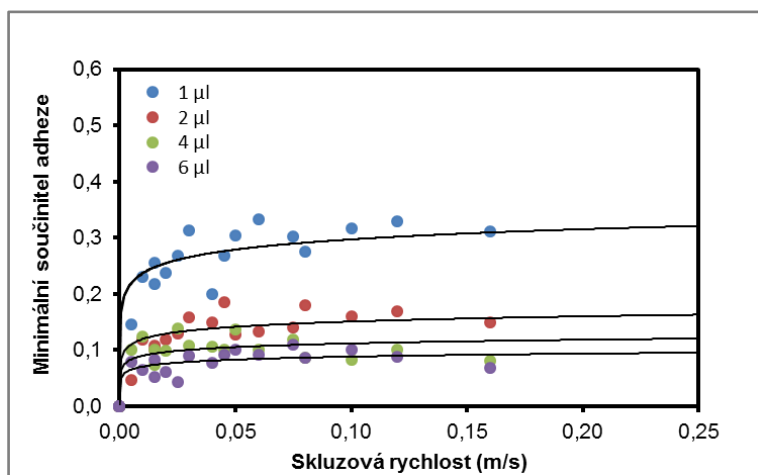
Vliv skluzové rychlosti a aplikovaného množství modifikátoru na vývoj adheze v kontaktu

Pro komplexní analýzu vlivu aplikovaného množství modifikátoru a skluzové rychlosti na vývoj adheze v kontaktu je provedena série 64 experimentů. Je vytvořeno 16 různých skluzových rychlostí (16 kombinací různých skluzů a rychlostí) a následně pro každou z nich provedeny experimenty a aplikací postupně 1, 2, 4 a 6 μl modifikátoru. Výsledky těchto experimentů lze pozorovat na obr. 51-52 a v tab. 5.

Na obr. 51 jsou zobrazeny výsledky vlivu skluzové rychlosti a aplikovaného množství modifikátoru tření na hodnotu minimální adheze bezprostředně po jeho aplikaci. Z výsledků je patrné, že hodnota součinitele adheze bezprostředně po aplikaci s rostoucím množstvím modifikátoru klesá. Jediné množství, které při nižších skluzových rychlostech zřetelně vykazovalo adhezi nad úroveň nízké adheze (nad 0,1), bylo 1 a 2 μl modifikátoru. Je také zřejmé, že rostoucí skluzovou rychlostí tato hodnota roste.

V tab. 5 lze pozorovat další ze sledovaných parametrů, a to průměrnou životnost třecí vrstvy modifikátoru. Je zřejmé, že s rostoucím množstvím aplikovaného modifikátoru roste životnost této vrstvy.

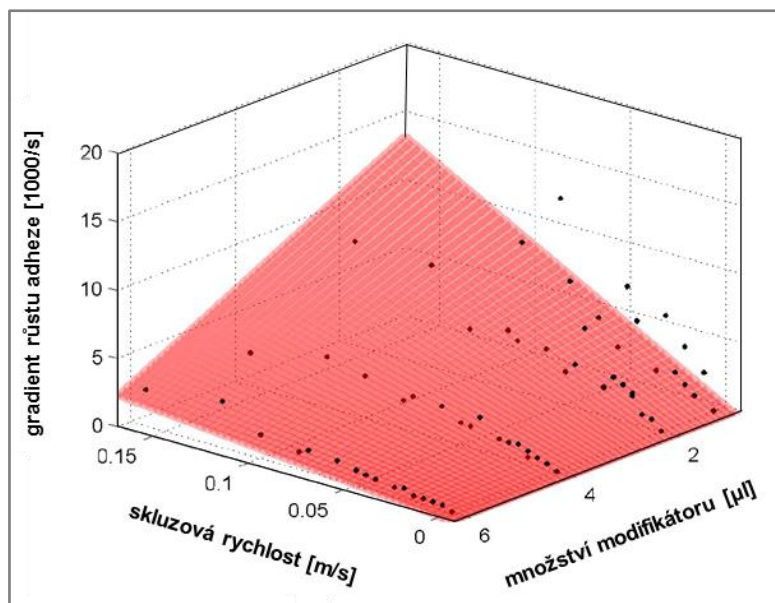
Posledním ze sledovaných parametrů této série experimentů je gradient růstu adheze. Závislost množství aplikovaného modifikátoru, skluzové rychlosti a gradientu růstu adheze lze pozorovat na obr. 52. Z tohoto grafu je zřejmé, že s rostoucím množstvím aplikovaného modifikátoru gradient klesá a tím pádem roste čas obnovy adheze na původní hodnoty suchého tření. U skluzové rychlosti je tento trend přesně opačný a to tak, že s rostoucí skluzovou rychlostí roste i gradient růstu adheze.



Obr. 51 Vliv kontaktních podmínek na minimální adhezi

Tab. 5 Životnosti třecí vrstvy modifikátoru

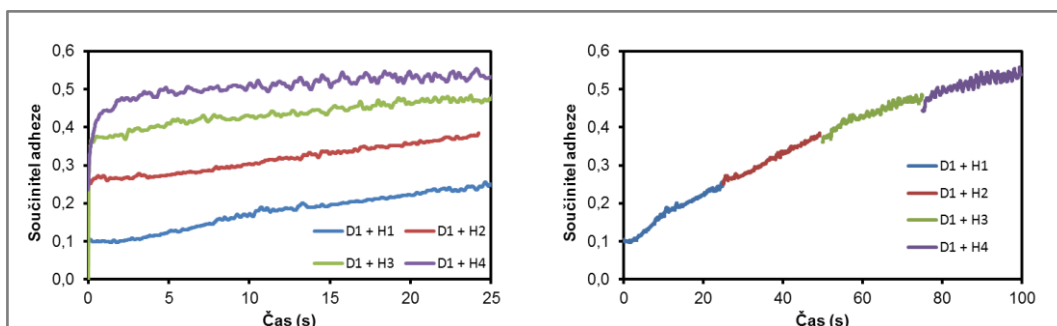
průměrná životnost třecí vrstvy podle skluzové vzdálenosti [m]			
1 μ l	2 μ l	4 μ l	6 μ l
1,001	3,952	8,531	14,534



Obr. 52 Vliv množství modifikátoru a skluzové rychlosti na gradient růstu adheze

Experiment redistribuce modifikátoru

Tento experiment sleduje vliv redistribuce modifikátoru mezi kontaktními tělesy na průběh adheze. Na počátku jsou na jeden z disků aplikovány 2 μ l modifikátoru a spuštěn experiment. Vždy po přibližně 25 s je experiment zastaven, horní disk simulující kolo vyměněn za nový čistý a experiment je opět spuštěn. Výsledky lze pozorovat na obr. 53, přičemž D1 značí disk kolejnice a H1-H4 postupně měněné disky simulující kolo. Z výsledků je zřejmé, že při změnách jednoho disku za čistý nedochází k žádným skokovým změnám adheze. Po výměně disku dochází k plynulému navázání na předchozí hodnotu součinitele adheze a jeho dalšímu vývoji ve směru vyšších hodnot, postupně až k hodnotě 0,6.

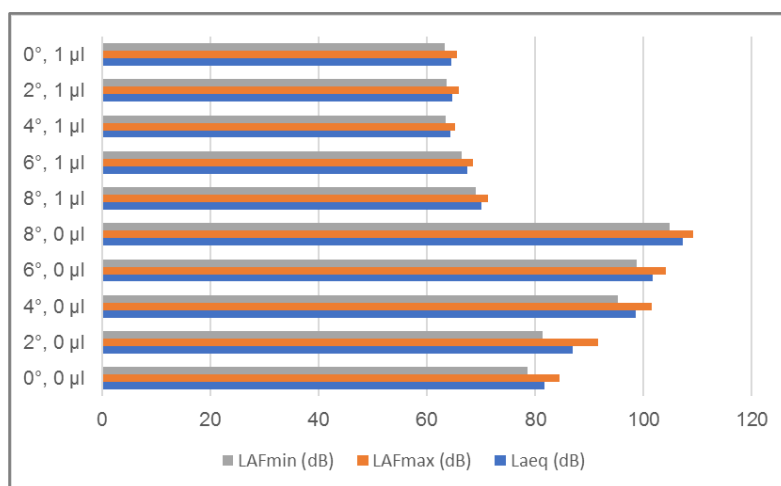


Obr. 53 Výsledky redistribučního experimentu

4.4 Hluková emise

V tomto experimentu, jehož výsledky lze pozorovat v grafu na obr. 54, je pozorován vliv modifikátoru a úhlu náběhu kola do traťového na hladinu akustického tlaku. Experiment je proveden s aplikací 1 μl modifikátoru. Délka každého měření se pohybuje okolo 10 s a je během něho sledována průměrná hladina akustického tlaku (L_{Aeq}), minimální hodnota akustického tlaku (L_{AFmin}) a maximální hodnota akustického tlaku (L_{AFmax}).

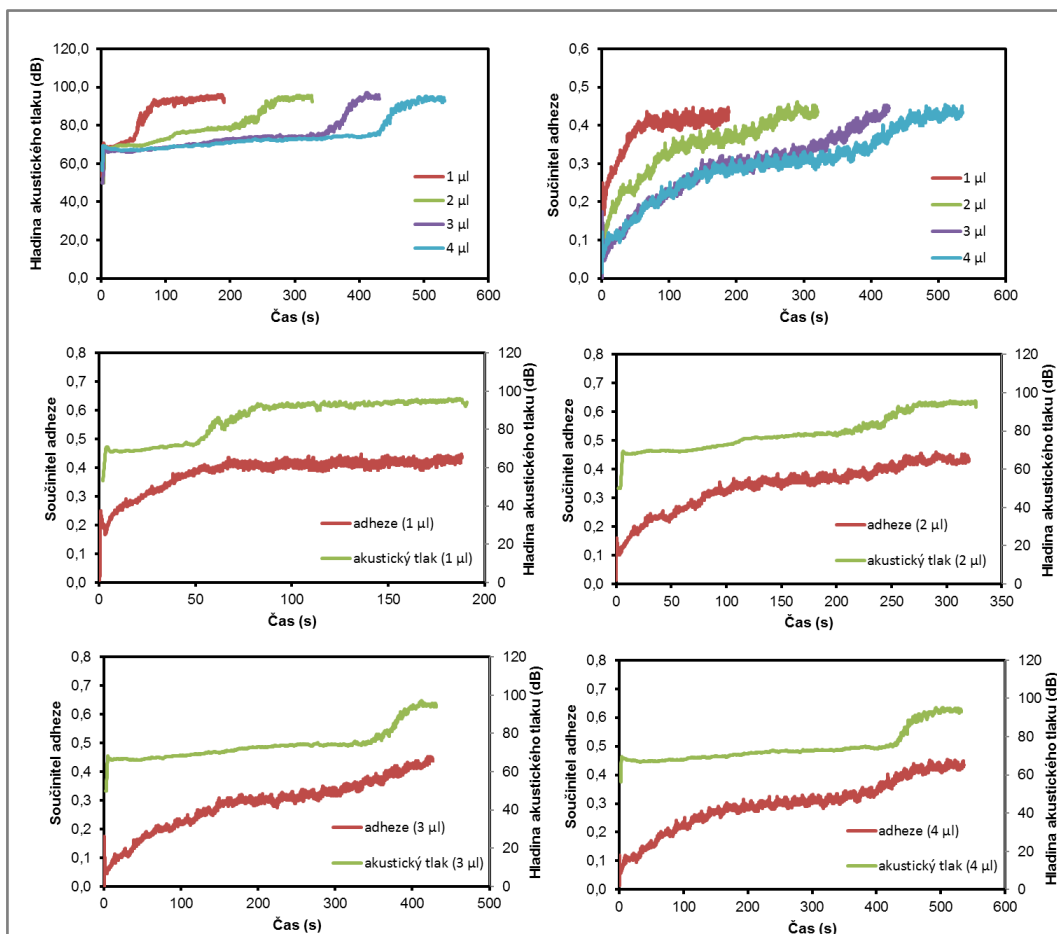
Dle výsledků je zřejmé, že s rostoucím úhlem náběhu dochází v případě suchého kontaktu k postupnému růstu průměrné hladiny akustického tlaku z 82 dB až na 107 dB. Po aplikaci modifikátoru dochází ve všech případech k poklesu této hladiny, a to až o 34,7 % (v případě 4°).



Obr. 54 Vliv modifikátoru a úhlu náběhu na hladinu akustického tlaku

V následujícím experimentu (obr. 55) je naopak sledován vliv různého množství modifikátoru na vývoj hladiny akustického tlaku při jednom úhlu náběhu (4°). Modifikátor je aplikován v množství 1-4 μl .

Z výsledků je zřejmé, že po aplikaci modifikátoru nastává ve všech případech pokles hladiny akustického tlaku a její pozvolný růst. V okamžiku, kdy se adheze začne blížit suchému kontaktu (0,3-0,4), nastává prudký růst hladiny akustického tlaku. Sluchem pozorovatele se jedná o přechod z klidového stavu do oblastí nepříjemných vysokofrekvenčních zvuků, typických při průjezdu tramvaje traťovým obloukem. S rostoucím množstvím modifikátoru v kontaktu roste i doba, po kterou je hladina akustického tlaku udržována na snížené úrovni oproti suchému kontaktu. V případě 4 μl modifikátoru dochází k prodloužení tohoto intervalu až o 90 % oproti 1 μl modifikátoru.



Obr. 55 Vliv množství modifikátoru na průběh hladiny akustického tlaku a adheze

4.5 Návrh výpočtového modelu aplikovaného množství modifikátoru tření

4.4.4 Výpočtový model množství modifikátoru tření

Vztahy (24-31) uvedené níže představují zjednodušený výpočtový model pro aplikované množství modifikátoru a jeho reaplikační interval. Jedním ze základních parametrů vstupujících do modelu je účel aplikace, resp. požadovaná hodnota součinitele adheze, a to buď 0,14 (redukce hluku) nebo 0,2 (redukce opotřebení). Podle informací o průměrné skluzové rychlosti (dle průměrné rychlosti a predikovaného skluzu) z několika předchozích průjezdů vozidla a podle požadovaného součinitele adheze, je z grafu na obr. 51 vybráno vhodné množství modifikátoru tření. Zde je nutné uvažovat již zmiňovaný výtlak modifikátoru, tzn. uvažovat pouhých 26,1 % z uvedeného množství, které se podílí na utváření třecí vrstvy. Toto množství je ovšem stále platné pro kontaktní plochu použitého dvoudiskového zařízení. Dle vztahů (24-27) je nutné vybrané množství přepočítat na reálnou kontaktní plochu na hlavě kolejnice. Dalším ze vstupů uživatele při instalaci aplikační jednotky je uvažovaná délka modifikované kolejnice L_{kol} a šířka uvažované kontaktní oblasti d_{kol} . Po získání aplikovaného množství modifikátoru je nutné určit i jeho reaplikační interval. Během tohoto kroku se vychází z tab. 5, kde jsou uvedeny průměrné

trvanlivosti třecích vrstev modifikátoru, podle aplikovaného množství. Trvanlivost dané vrstvy z dvoudiskového zařízení je vztahem (28), převedena na trvanlivost skutečné vrstvy na kolejnici o uvažované délce. S informací o (predikovaném) skluzu kolejového vozidla je pomocí vztahu (29) získána skluzová vzdálenost jedné nápravy na uvažovaném úseku L_{kol} . To znamená, že je získána hodnota úběru na životnosti třecí vrstvy od jedné projeté nápravy. V tomto případě je ovšem nutné zmínit, že je uvažováno rovnoměrné roznesení modifikátoru v celé délce a vytvoření vrstvy o homogenní tloušťce. Z takto získaných údajů a s pomocí indukčních čidel monitorujících počet projetych náprav lze podle vztahů (30-31) vyčíslit reapikační interval daného množství.

$$S_{td} = 2\pi R_{TD} d_{td} \quad (24)$$

$$S_{kol} = L_{kol} d_{kol} \quad (25)$$

$$V_{KOL} = \frac{V_{td} S_{kol}}{S_{td}} \quad (26)$$

$$m_{kol} = \rho V_{kol} \quad (27)$$

$$T_{kol} = \frac{T_{td} L_{kol}}{2\pi R_{td}} \quad (28)$$

$$T_{os} = \gamma L_{kol} \quad (29)$$

$$N_{vrst} = \frac{T_{kol}}{T_{os}} \quad (30)$$

$$I_{ap} = \frac{m_{kol}}{N_{vrst}} \quad (31)$$

Kde:

R_{td}	[m]	Poloměr disku na dvoudiskovém zařízení (40 mm)
d_{td}	[m]	Šířka kontaktní oblasti na disku dvoudiskového zařízení (2 mm)
d_{kol}	[m]	Uvažovaná šířka kontaktní oblasti na kolejnici
L_{kol}	[m]	Délka uvažované kolejnici
T_{td}	[m]	Trvanlivost dané vrstvy modifikátoru na dvoudiskovém zařízení
T_{kol}	[m]	Trvanlivost utvořené vrstvy na uvažované kolejnici
T_{os}	[m]	Úběr životnosti dané vrstvy na kolejnici od jedné nápravy
S_{td}	[m ²]	Celková plocha kontaktní oblasti na dvoudiskovém zařízení
S_{td}	[m ²]	Uvažovaná modifikovaná plocha na hlavě kolejnici
V_{td}	[m ³]	Požadované množství modifikátoru z dvoudiskového zařízení
V_{kol}	[m ³]	Reálné množství modifikátoru pro uvažovanou kolejnici
m_{kol}	[kg]	Hmotnost množství modifikátoru pro uvažovanou kolejnici
N_{vrst}		Počet náprav do konce životnosti utvořené vrstvy modifikátoru
γ		Uvažovaný skluz vozidla

4.4.5 Porovnání výpočtového modelu s experimentem

Pro posouzení, jak moc je navržený výpočtový algoritmus vzdálen realitě, je vytvořeno zadání odpovídající podmínkám experimentu provedenému na reálné trati. Výsledky modelu jsou následně porovnány s výsledky experimentu. Podmínky experimentu a zadání jsou uvedeny v tab. 6. Rychlost tramvaje se během experimentu pohybovala okolo 40 km/h. Předpokládaný skluz je stanoven na 3 %. Reálná šířka kontaktní oblasti se pohybuje běžně okolo 5 mm. Z důvodu opotřebení kontaktních ploch, zřetelného opotřebení hlavy kolejnice téměř v celé šířce (obr. 56) a z důvodu vůlí mezi rozchodem kolejnic a rozvorem kol je uvažovaná kontaktní šířka navýšena o 100 % z každé strany, a tedy celkově na 15 mm. Uvažovaná délka modifikovaného úseku je 100 m, jelikož právě do této vzdálenosti bylo během experimentu zaznamenáno roznesení modifikátoru.



Obr. 56 Opotřebení hlavy kolejnice

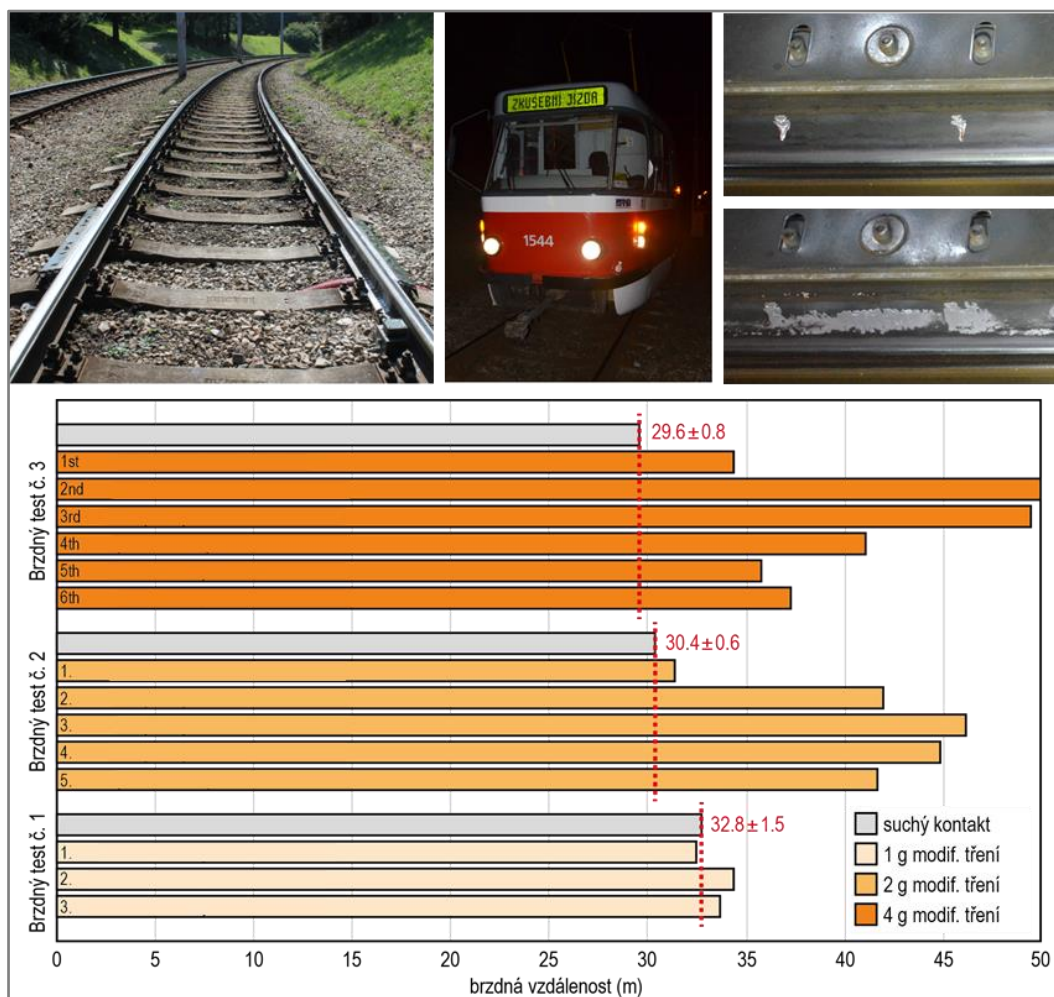
Skluvá rychlost dle zadání činí 3,33 m/s. Uvažovaným čelem aplikace je redukce hluku (součinitel adheze 0,14) resp. optimalizace adheze (součinitel adheze 0,2). Pro zvolenou skluzovou rychlost je v grafu na obr. 51 dle požadovaných hodnot adheze vybráno jako nejvhodnější množství 1,5 μ l resp. 1 μ l modifikátoru. Tato množství jsou následně výše uvedenými vztahy (24-27) převedena na reálné požadované množství. Požadované množství pro redukcii hluku činí $m_{kol} = 1,34$ g množství pro optimalizaci adheze činí $m_{kol} = 0,896$ g.

Tab. 6 Zadání úlohy a experimentu

délka uvažovaného úseku	100 m
uvažovaná šířka kontaktní oblasti na hlavě kolejnice	15 mm
rychlost tramvaje	40 km/h
uvažovaný skluz	3 %

Experiment na reálné trati byl proveden Ing. Radovanem Galasem. Během tohoto experimentu je s využitím tramvaje Tatra T3M a pod dohledem Dopravního podniku města Brna sledován vliv množství modifikátoru na brzdnu dráhu a roznesení maziva. Testovaným množstvím jsou 1, 2 a 4 μ l modifikátoru. Průběh experimentu je následovný. Tramvaj o rychlosti 40 km/h začíná v místě aplikace modifikátoru brzdít, přičemž je sledována jak délka brzdě dráhy, tak blokování a prokluz kol. Po zabrzdění

tramvaj vždy dojede až do 150 m vzdálené zastávky z důvodu simulace reálného roznesení modifikátoru po trati. Takový průjezd je opakován několikrát. Na obr. 57 lze pozorovat výsledky experimentu. Po aplikaci 1 g dosahuje brzdná dráha přibližně stejných výsledků jako za suchých podmínek, přičemž stopy po modifikátoru jsou okem patrné maximálně do vzdálenosti 100 m. U množství 2 g je při některých průjezdech patrné zablokování kol, jejich prokluz a značné navýšení brzdné dráhy oproti suchým podmínkám.



Obr. 57 Průběh a výsledky experimentu na reálné trati

Optimální množství modifikátoru při zachování brzdné dráhy je tedy experimentem na reálné trati stanoveno na 1 g. Výpočtovým modelem je stanoveno teoretické množství 1,34 g za účelem redukce hluku a 0,896 g za účelem optimalizace adheze. Na první pohled dochází k relativně dobré shodě mezi teoretickými a experimentálními výsledky. Jelikož je ale výpočtový algoritmus navržen na základě několika předpokladů a zjednodušení, je nutné jej odladit přímo na reálné trati. Jediným závěrem, který je v tuto chvíli možné vyvodit je, že teoretické množství modifikátoru se pohybuje ve stejných řádech jako to, které bylo zjištěno experimentem na reálné trati. Tím byla potvrzena životaschopnost navrženého algoritmu a jeho potenciál při budoucím řízení adheze v kontaktu kola a kolejnice.

5 DISKUSE

5.1 Parametry experimentálního zařízení a jejich vliv na výsledky

V úvodu rešersní studie byl uveden přehled experimentálních zařízení vhodných pro studium a simulaci adheze v kontaktu kola a kolejnice. Jako nejvhodnější varianta pro tuto práci bylo vybráno dvoudiskové zařízení. Ačkoli oproti zařízením v životní velikosti poskytuje určité měřítkové zkreslení, je finančně přijatelnější a poskytuje přesnější nastavení a větší kontrolu nad provozními parametry. Jeho největší nevýhoda, která se projevovala v průběhu celé této práce byla maximální dosažitelná rychlost. Z důvodu konstrukčních limit tohoto zařízení bylo nutné pohybovat se v rozmezí 0-2,5 m/s. Ostatní provozní parametry byly voleny v rozmezí tak, aby reflektovaly reálné kontaktní podmínky kola a kolejnice.

Při výrobě kontaktních těles dvoudiskového zařízení bylo zpočátku dbáno na to, aby se svým materiálem, chemickým složením a tepelným zpracováním co nejvíce blížily materiálu železničních kol R7T a kolejnice UIC 900A. Jako nejvhodnější varianta byla vybrána ocel 12 050. Disky byly zakaleny v celém objemu na hodnoty 254 HB (disk simulující kolo) a 300 HB (disk simulující kolo), aby odpovídaly reálným tělesům. Během prvních experimentů tyto disky vykazovaly poměrně výrazné projevy opotřebení, a to ve dvou podobách. Tou první je odlupování kovových šupin z povrchu disků a nadměrná tvorba otěrových částic (obr 36), což způsobovalo zkreslení výsledků a umělé navýšení adheze (obr.37). Příčinou tohoto problému byla pravděpodobně nízká pevnost materiálu ve smyku. Druhým problémem bylo nerovnoměrné opotřebení disků ve směru od krajů. Příčinou byly velké hranové efekty, ke kterým docházelo z důvodu konstrukčních vad experimentálního zařízení a neschopnosti dostatečného ustavení disků. Tento problém byl vyřešen výrobou nových disků z oceli 14 209 se zakalením v celém objemu na hodnotu 630 HB. Z důvodu eliminace hranových efektů bylo navíc přistoupeno k simulaci bodového kontaktu, a to osazením jednoho z disků rádiusem o velikosti 50 mm. Lewis [43] uvádí, že adheze v kontaktu je přímo ovlivněna třecí vrstvou a jejím složením, které se extrémně liší v závislosti na okolní teplotě a vlhkosti. Lewis také uvádí, že určitou úlohu při formování třecí vrstvy hrají i částice opotřebení a otěru. Použitím ložiskové oceli sice dojde ke snížení množství otěru v kontaktu, na druhou stranu ale nebude docházet ke zkreslování výsledků právě tímto otěrem, jak bylo dokázáno v experimentu na obr. 37. Změna materiálu kontaktních těles by mohla znamenat velké zkreslení výsledků v případě použití modifikátoru na vodní bázi. U vodních modifikátorů dochází po odpaření kapalně složky k přímé interakci pevných částic s třecí vrstvou. Z toho důvodu je pro tyto modifikátory složení třecí vrstvy klíčové. V této práci je ale použit modifikátor na olejové bázi. Z toho důvodu lze předpokládat, že nebude docházet k odpařování kapalně složky a změna materiálu na ložiskovou ocel nebude mít na výsledky experimentů výraznější dopad. V souvislosti s Lewisovými výsledky [43] byl navíc kladen důraz na zachování totožných podmínek pro všechny experimenty, tzn. konstantní pokojová teplota a provedení záběhu pro utvoření třecí vrstvy před každým experimentem. Teorii o minimálním dopadu změny materiálu disků na výsledky potvrdili i Baek [7] a Areiza [46]. Baek pro své studium využíval dvoudiskové zařízení s disky vyrobenými přímo z reálné kolejnice, přičemž během experimentů v suchém kontaktu dosahoval součinitele adheze až 0,6. Areiza vypracoval přehled experimentálních zařízení pro studium kontaktu kola a kolejnice.

Průměrná hodnota součinitele adheze se na vybraných dvoudiskových zařízeních pohybovala okolo 0,6. V této práci byla za suchého kontaktu získána stejná hodnota součinitele adheze jako u obou zmiňovaných autorů. Z toho důvodu, lze považovat záměnu materiálu disků za nepodstatnou.

5.2 Zhodnocení experimentální části

5.2

5.2.1 Experimenty vlivu provozních parametrů na modifikovaný kontakt

5.2.1

V této části práce byl studován vliv vybraného modifikátoru na adhezi v kontaktu. Byla sestavena série experimentů popisujících vliv modifikátoru v kombinaci s různými provozními parametry tak, aby tyto experimenty pokryly co největší spektrum možných kontaktních situací. Takto získaná data byla následně zpracována ve formě databáze pro řídicí systém vyvíjené off-board jednotky. Z výsledků je zřejmé, že největší vliv na vývoj adheze v modifikovaném kontaktu bez kontaminantů má skluz, resp. skluzová rychlost. K podobným výsledkům dospěl i Arias-Cuevas [51], který ve své práci studoval vývoj adheze v kontaktu za použití dvou různých modifikátorů tření. Z jeho výsledků je zřejmé, že výrazný vliv na růst adheze v modifikovaném kontaktu má právě skluzová rychlost. V této práci byla také potvrzena schopnost použitého modifikátoru *Lubcon Sintono Terra HLK* efektivně řídit adhezi v kontaktu kola a kolejnice v závislosti na aplikovaném množství. Jeho chování odpovídá i výsledkům, které ve své publikaci popisuje Galas [11]. Ten studoval dva modifikátory na olejové bázi, přičemž jeden z nich byl právě modifikátor *Lubcon Sintono Terra HLK*. Po aplikaci vhodného množství modifikátoru byl v této i Galasově práci zaznamenán pokles adheze na požadovanou úroveň. S rostoucím množstvím modifikátoru také rostla perioda, po kterou se adheze pohybovala v určitém sníženém rozmezí oproti suchému kontaktu. Naopak při aplikaci nadměrného množství docházelo k poklesu adheze k hodnotám nízké adheze (okolo 0,1).

Z výsledků redistribučního experimentu, kdy byl vždy jeden z disků v modifikovaném kontaktu vyměněn za čistý, vyplývá, že po této záměně nedocházelo k žádnému skokovému jevu v průběhu adheze. Vždy docházelo k plynulému navázání adheze na předchozí hodnotu. Pro reálné podmínky to znamená, že k modifikaci adheze stačí vrstva na jednom kontaktním tělese (kolejnici) a v případě příjezdu tramvaje na toto místo dojde k plynulému navázání na tuto vrstvu.

5.2.2 Vliv kontaminantů tratě na modifikovaný kontakt

5.2.2

Pro studium vlivu kontaminantů na adhezi v modifikovaném kontaktu byly vybrány kontaminanty tratě, které jsou pro naše podmínky nejběžnější, tzn. voda a listí. Místo samotného listí byl dle vzoru Machatky [3] připraven listový extrakt. Listový extrakt způsobuje pokles adheze pod úroveň nízké adheze (tzn. pod 0,1) a současně poskytuje mnohem stabilnější kontaktní podmínky než samotné listí. Během experimentu kontaminace vodou byl kontakt zaplaven vodou v množství 3 ml/min tak, aby byly simulovány podmínky silného deště. V čistém kontaktu způsobila voda pokles adheze z 0,6 na přibližně 0,2. Úroveň poklesu odpovídá výsledkům v publikacích [15,17]. Po aplikaci i toho nejmenšího možného množství modifikátoru (1 μ l) došlo v kombinaci s vodou k dlouhodobému propadu adheze pod kritickou úroveň, tzn. pod 0,05. Tento jev je pravděpodobně ekvivalentem jevu, který ve své práci popisuje Wang [15]. Wang

uvádí, že emulze vody a oleje vede na hodnotu součinitele adheze okolo 0,02, což je méně než adheze při kontaminaci samotným olejem (0,025) nebo vodou (0,19). V tomto experimentu byla zřejmě příčinou tak výrazného poklesu adheze emulze vody a olejové složky modifikátoru *Lubcon Sintono Terra HLK*.

Během experimentu s listovým extraktem byla potvrzena schopnost tohoto extraktu simulovat podmínky kontaminace listím. Po aplikaci extraktu do kontaktu došlo k poklesu adheze pod hodnotu 0,1, což je klasifikováno již jako nízká adheze. Tento pokles přesně odpovídá hodnotám součinitele adheze, jakých dosáhl po aplikaci list. extraktu i Machatka [3]. Po aplikaci modifikátoru, i když v minimálním množství, došlo k dlouhodobému poklesu adheze až k hodnotám okolo 0,01. Jak uvádí Li [29] a Omasta [18], nejefektivnějším způsobem, jak potlačit dopady kontaminace listím, stále zůstává pískování kontaktu nebo použití VHPF modifikátoru tření.

V případě obou kontaminantů dochází po aplikaci minimálního množství modifikátoru k poklesu adheze pod kritickou úroveň. Použitý modifikátor má tedy výrazně negativní vliv na adhezi při použití v kontaminovaných podmínkách. Pro řídicí systém to znamená, vysazení tohoto modifikátoru z provozu z důvodu bezpečnosti a zaručení schopnosti brzdění i za podmínek deště.

Experimenty sledujícími vliv modifikátoru na hladinu akustického tlaku byla prokázána schopnost dvoudiskového zařízení simulovat zvýšenou hladinu hluku v závislosti na úhlu náběhu disku. U prvního ze série experimentů (obr. 54) došlo po aplikaci 1 μ l modifikátoru k poklesu hladiny akustického tlaku až o necelých 35 %. U druhého experimentu (obr. 55) docházelo s rostoucím množstvím modifikátoru k prodlužování intervalu, po který je hladina akustického tlaku udržována na snížené úrovni. Těmito experimenty byla prokázána schopnost modifikátoru efektivně redukovat a řídit hladinu akustického tlaku v traťových obloucích, a to v závislosti na aplikovaném množství modifikátoru. Podobných výsledků bylo dosaženo i v Eadieho práci [23]. Po aplikaci vybraného modifikátoru v několika reálných traťových obloucích zaznamenal až 23% snížení hladiny akustického tlaku. V reálných podmínkách ovšem nemusí dojít k tak výraznému snížení hladiny akustického tlaku (o 35 %), jak bylo zjištěno v této práci. Dvoudiskové zařízení může mít mnohem klidnější chod než samotná tramvaj, což by znamenalo mnohem větší rozdíly v hladinách akustických tlaků při suchém a modifikovaném kontaktu. Tzn. že i po aplikaci modifikátoru na reálné trati do měření stále vstupuje hluk způsobený mechanickými částmi tramvaje, a tím pádem nemusí docházet k tak velkým rozdílům mezi hlukem s modifikací kontaktu a bez modifikace.

5.2.3 Srovnání komerčních modifikátorů

Pro získání představ o tom, jaký dopad by mohla mít záměna modifikátoru v aplikační jednotce, byl modifikátor *Lubcon Sintono Terra HLK* porovnán s dalšími třemi komerčně dostupnými modifikátory, a to jak za suchých, tak vodou kontaminovaných podmínek. Pro srovnání byly využity 2 olejové modifikátory pod označením FM1, FM2 a jeden vodní pod označením FM3. Modifikátor FM2 vykazoval oproti Lubconu přibližně o 150 % větší mazací schopnost a delší interval udržení adheze pod úroveň 0,4. Případná záměna modifikátoru tření v aplikační jednotce navržené pro jeden konkrétní modifikátor, by mohla vést až k přemazání koleje, ztráty brzděné schopnosti a fatálním následkům. U kontaminace vodou došlo u všech čtyř komerčních modifikátorů pouze ke zhoršení adheze, a to pod kritickou

úroveň. Použití kteréhokoliv z těchto čtyř modifikátoru by tedy v případě deště znamenalo kritickou ztrátu adheze, schopnosti brždění a snížení bezpečnosti.

5.3 Zhodnocení navrženého řídicího systému

5.3

Byl vytvořen návrh aktivního řídicího systému aplikační (off-board) jednotky, který vyhodnocuje množství modifikátoru s ohledem na informace o aktuální skluzové rychlosti a okolních klimatických podmínkách. Tento systém byl navržen pro dva odlišné účely, a to buď pro redukci hlukové emise nebo pro optimalizaci adheze a snížení opotřebení. Vstupem uživatele do tohoto systému je pouze účel použití aplikační jednotky, délka požadovaného modifikovaného úseku a predikovaný skluz v kontaktu.

Určení aktuální adheze kolejového vozidla probíhá v řídicím systému na základě predikčního vztahu. Při výběru predikčního vztahu pro řídicí systém se v porovnání s experimentálně získanými daty na první pohled jeví jako nejvhodnější varianta Galtonův vztah (14). Predikci adheze při rychlostech v rozmezí 0-30 m/s ovšem nelze na základě experimentálních dat považovat za příliš přesnou, jelikož je stanovena z experimentů provedených při rychlostech maximálně do 2,5 m/s. Z důvodu konstrukčních limit dvoudiskového zařízení není možné provádět experimenty při vyšších rychlostech, a proto je nutné při výběru nejvhodnějšího vztahu predikujícího adhezi na základě rychlosti vycházet i z výsledků jiných autorů. Gallardo-Hernandez [17] a Areize [46] ve svých pracích uvedly přehled průměrných hodnot adheze dosahovaných na různých experimentálních zařízeních. Mezi uvedená zařízení v těchto pracích patří dvoudisková zařízení, MTM, pin on disc reometry, zařízení v životní velikosti, ruční železniční tribometry nebo speciální tribometry upevněné přímo na lokomotivě či jiném kolejovém vozidle. Z přehledů obou těchto autorů vyplývá, že průměrné hodnoty adheze se na dvoudiskovém zařízení pohybují běžně okolo 0,6 (pro suchý kontakt), což je v souladu experimentálními daty získanými v této práci. Dále bylo zjištěno, že průměrné hodnoty adheze na dvoudiskovém zařízení mírně převyšují ty, které byly získány na reálné trati. Průměrné hodnoty součinitele adheze získané při těch nejnižších rychlostech na ručním železničním tribometru se pohybovaly běžně okolo 0,4-0,5. Dalším důležitým poznatkem je, že průměrné hodnoty adheze se na tribometru umístěném přímo na kolejovém vozidle pohybovaly okolo 0,2-0,4 při rychlostech v rozmezí 0-80 km/h. S přihlédnutím ke všem uvedeným poznatkům je jako nejvhodnější varianta pro řídicí systém vybrán Fingerberg-Kraftův vztah (8-10).

Ověření funkčnosti výpočtového algoritmu

Pro vytvoření představy, jak moc je výpočtový model vzdálen realitě, bylo pro srovnání výsledků provedeno několik experimentů na reálné trati. Během tohoto experimentu byla sledována brzdná dráha tramvaje Tatra T3M v závislosti na aplikovaném množství modifikátoru. Optimální množství modifikátoru při zachování brzdné dráhy bylo experimentem na reálné trati stanoveno na 1 g. Výpočtovým modelem je stanoveno teoretické množství 1,34 g za účelem redukce hluku a 0,896 g za účelem optimalizace adheze. Na první pohled dochází k relativně dobré shodě mezi teoretickými a experimentálními výsledky. Jelikož je ale výpočtový algoritmus navržen na základě několika předpokladů a zjednodušení, nelze se spokojit pouze

s tímto výsledkem. Pro správnou funkčnost off-board jednotky je nutné její řídicí systém odladit přímo na reálné trati. Jediným závěrem, který je v tuto chvíli možné vyvodit je, že teoretické množství modifikátoru se pohybuje ve stejných řádech jako množství zjištěné experimentem na reálné trati. Tím byla potvrzena životaschopnost navrženého algoritmu a jeho potenciál při budoucím řízení adheze v kontaktu kola a kolejnice.

Jedním z předpokladů navrženého algoritmu je šířka kontaktní oblasti. Reálná šířka kontaktu se u neopotřeбенého kola a kolejnice pohybuje okolo 5 mm. Tato hodnota je pouze a jen teoretická. Ve skutečnosti se vyskytují kolejnice různého stupně a šířky opotřeбенí. Opotřeбенí hlavy kolejnice se často vyskytuje i v plné šířce. Různá šířka opotřeбенí je kombinací daného úseku tratě, různého stupně opotřeбенí kol a vůlí mezi rozvozem kol a rozchodem kolejnic. Při instalaci aplikační jednotky v daném úseku tratě je tedy nutné volit šířku kontaktní oblasti tak, aby byla pokryta oblast kontaktu pro většinu projíždějících tramvají. V případě zvolení příliš velké šířky by mohlo docházet k přemazávání daného úseku a ztrátě brzdné schopnosti.

Dalším úskalím navrženého systému je maximální roznesení modifikátoru tření. Systém je v tuto chvíli navržen pro modifikaci až nekonečně dlouhého úseku. Z praktických zkušeností, které popisuje např. Khan [32], je ale zřejmé, že pro každý modifikátor existuje hranice maximální délky roznesení. Při dodržení aplikačních pokynů je vzdálenost roznesení modifikátoru často řádově vzdálená dokonce i tomu, co uvádí samotný výrobce. Z toho důvodu je vhodné provést v budoucnu několik experimentů na reálné trati, které by stanovily maximální roznesení modifikátoru tření, a tedy i limity aplikační jednotky.

Při navrhování výpočtového modelu aplikovaného množství modifikátoru bylo také uvažováno rovnoměrné roznesení modifikátoru tření a homogenní tloušťka vytvořené vrstvy v celé délce uvažované kolejnice. V reálných podmínkách k takovému předpokladu téměř jistě nedojde a může nastat několik situací. Tou první jsou extrémy na obou koncích uvažovaného úseku. Po aplikaci modifikátoru může docházet k přemazávání kolejnice v místě aplikační jednotky. Naopak na druhém konci úseku bude docházet zpočátku k suchému kontaktu. Tento jev by měl být zmírněn po projetí několika vozů a lepším roznesení modifikátoru tření. Druhou situací je roznesení modifikátoru, do větší než uvažované vzdálenosti. V takovém případě by v uvažovaném úseku a za ním byla vytvořena nedostatečná vrstva modifikátoru poskytující vyšší než požadovanou adhezi. Tento jev by měl být potlačen vhodným aplikačním intervalem.

V neposlední řadě je nutné věnovat pozornost i samotné aplikační jednotce. Je předpokládáno, že stejně jako u dvoudiskového zařízení bude na reálné trati docházet k výtlačku aplikovaného modifikátoru mimo kontakt, a to v závislosti na konstrukci aplikační jednotky a způsobu aplikace. V budoucnu by tedy bylo vhodné experimentálně stanovit aplikační limity této jednotky a dle výsledků zkorigovat i řídicí algoritmus.

6 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývala studiem vlivu vybraného modifikátoru tření na adhezi v kontaktu kola a kolejnice. Jedná se o experimentální a komplexní studium adheze v kontaktu kola a kolejnice při aplikaci různého množství modifikátoru tření, různých provozních parametrech a kontaminantech tratě. Problémy kolejové dopravy jako jsou nadměrné opotřebení, zvýšená hladina hlukové emise nebo bezpečnost často pramení právě z nevhodné adheze v kontaktu kola a kolejnice. Efektivním řešením těchto problémů je využití aktivních aplikačních jednotek. Tyto jednotky využívají modifikátor tření k řízení adheze v kontaktu, a to v závislosti na aktuálních provozních a okolních podmínkách. Ke správnému fungování aktivní aplikační jednotky bylo nutné popsat chování daného modifikátoru za různých kontaktních podmínek.

V úvodu této práce byl podán přehled současného stavu poznání. Tento přehled představuje souhrn nejběžnějších provozních parametrů, okolních podmínek a kontaminantů tratě majících vliv na adhezi v kontaktu kola a kolejnice. Na základě rešeršní studie byly pro experimentální studium vybrány ty nejvýznamnější z nich. Vybranými parametry byly rychlost vozidla, skluz, kontaktní tlak, úhel náběhu kola do traťového oblouku, kontaminace vodou a kontaminace listím. Jako nejlepší varianta experimentálního zařízení bylo pro tuto práci vybráno dvoudiskové zařízení. I přes své rychlostní limity poskytovalo dvoudiskové zařízení v průběhu celé práce přesné nastavení a kontrolu na vybranými provozními parametry. V první fázi byly provedeny experimenty popisující vliv samotných provozních parametrů na adhezi v suchém kontaktu. V druhé fázi byla adheze v kontaktu studována již s aplikací modifikátoru tření v různém množství, a to jak v suchém, tak kontaminovaném kontaktu. Ze získaných dat byla s ohledem na přehled současného stavu poznání vytvořena databáze pro následně navržený řídicí systém reálné aplikační jednotky. Kromě způsobu řízení aktivní aplikační jednotky byl navržen také výpočtový model udávající požadované množství modifikátoru tření a jeho reaplikační interval. Experimentem na reálné trati byla následně ověřena životaschopnost a potenciál navrženého systému řídit adhezi v kontaktu kola a kolejnice.

Veškeré cíle této diplomové práce byly splněny v plném rozsahu. Na základě rešeršní studie byly stanoveny nejvýznamnější parametry ovlivňující adhezi v kontaktu kola a kolejnice. Byl experimentálně popsán vliv aplikovaného množství modifikátoru tření v závislosti na provozních a okolních podmínkách. Dále bylo navrženo schéma řízení adaptivního systému pro řízení adheze. Navíc byl pro tento systém vytvořen i jednoduchý výpočtový model stanovující množství modifikátoru a interval aplikace. Získané výsledky byly poté publikovány v odborném článku v konferenčním sborníku.

Vytvoření databáze pro řídicí systém reálné aplikační jednotky a jeho návrh probíhalo na základě několika předpokladů a zjednodušení. Pro implementaci výsledků do reálných podmínek je nutné provést sérii doplňkových experimentů přímo na reálné trati. Podstata těchto experimentů byla popsána v diskusní části této práce.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Wheel-rail interface handbook*. 1. vyd. Editor R. Lewis, U. Olofsson. Cambridge: Woodhead, 2009, xxii, 842 s. Woodhead publishing in mechanical engineering. ISBN 978-1-84569-412-8.
- [2] ZHU, Y. *Adhesion in the wheel–rail contact*. Stockholm, 2013, 32 p. Disertační práce na Royal Institute of Technology, Department of Machine Design. ISBN 978-91-7501-896-6
- [3] MACHATKA, M. *Experimentální výzkum pískování v kontaktu kola a kolejnice*. Brno, 2014, 92 s. Diplomová práce na Vysokém učení technickém na Ústavu konstruování. Vedoucí práce Ing. Milan Omasta, Ph.D.
- [4] CHEN, H., T. BAN, M. ISHIDA, T. NAKAHARA. Experimental investigation of influential factors on adhesion between wheel and rail under wet conditions. *Wear*. [online]. 2008, roč. 265, s. 1504-1511. [cit. 2017-3-4]. URL <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164808001646>>. ISSN 0043-1648
- [5] *Rail Research UK Association* [online]. ©2012 [cit. 2017-03-04]. URL <<http://www.rrika.org.uk/>>
- [6] HOU, K., J. KALOUSEK, E. MAGEL. Rheological model of solid layer in rolling contact. *Wear*. [online]. 1997, roč. 211, s. 134-140. [cit. 2017-3-4]. URL<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164897000975>> . ISSN 0043-1648
- [7] BAEK, K.-S., K. KYOGOKU, T. NAKAHARA. An experimental study of transient traction characteristics between rail and wheel under low slip and low speed conditions. *Wear*. [online]. 2008, roč. 265, s. 1417-1424. [cit. 2017-3-4]. URL<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164808002007>> . ISSN 0043-1648
- [8] NAKAHARA, T., K.-S. BAEK, H. CHEN, M. ISHIDA. Relationship between surface oxide layer and transient traction characteristics for two steel rollers under unlubricated and water lubricated conditions. *Wear*. [online]. 2011, roč. 271, s. 25-31. [cit. 2017-3-4]. URL<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164810003649>> . ISSN 0043-1648
- [9] ZHANG, W., J. CHEN, X. WU, X. JIN. Wheel/rail adhesion and analysis by using full scale roller rig. *Wear*. [online]. 2002, roč. 253, s. 82-88. [cit. 2017-3-4]. URL<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164802000868>> . ISSN 0043-1648

- [10] STOCK, R., D. T. EADIE, D. ELVIDGE, K. OLDKNOW. Influencing rolling contact fatigue through top of rail friction modifier application – A full scale wheel–rail test rig study. *Wear*. [online]. 2011, roč. 271, s. 134-142. [cit. 2017-3-4].
URL<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164810003406>>
. ISSN 0043-1648
- [11] GALAS, R., M. OMASTA, I. KRUPKA, M. HARTL. Laboratory investigation of ability of oil-based friction modifiers to control adhesion at wheel-rail interface. *Wear*. [online]. 2016, roč. 368–369, s. 230-238. [cit. 2017-3-4].
URL<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164816303283>>
. ISSN 0043-1648
- [12] PCS-INSTRUMENTS [online]. [cit. 2016-04-22]. URL<<http://pcs-instruments.com>>
- [13] THEO, M. *Encyclopedia of lubricants and lubrication*. 1. vyd. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. ISBN 978-36-422-2646-5
- [14] WANG, W.J., P. SHEN, J.H. SONG, J. GUO, Q.Y. LIU, X.S. JIN. Experimental study on adhesion behavior of wheel/rail under dry and water conditions. *Wear*. [online]. 2011, roč. 271, s. 2699-2705. [cit. 2017-3-4].
URL<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164811002389>>
. ISSN 0043-1648
- [15] WANG, W.J., H.F. ZHANG, H.Y. WANG, Q.Y. LIU, M.H. ZHU. Study on the adhesion behavior of wheel/rail under oil, water and sanding conditions. *Wear*. [online]. 2011, roč. 271, s. 2693-2698. [cit. 2017-3-4].
URL<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164811001177>>
. ISSN 0043-1648
- [16] BAEK, K.-S., K. KYOGOKU, T. NAKAHARA. An experimental investigation of transient traction characteristics in rolling–sliding wheel/rail contacts under dry–wet conditions. *Wear*. [online]. 2007, roč. 263, s. 169-179. [cit. 2017-3-4].
URL<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164807003146>>
. ISSN 0043-1648
- [17] GALLARDO-HERNANDEZ, E.A., R. LEWIS. Twin disc assessment of wheel/rail adhesion. *Wear*. [online]. 2008, roč. 265, s. 1309-1316. [cit. 2017-3-4].
URL<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164808001622>>
. ISSN 0043-1648

- [18] OMASTA, M., M. MACHATKA, D. SMEJKAL, M. HARTL, I. KŘUPKA. Influence of sanding parameters on adhesion recovery in contaminated wheel–rail contact. *Wear*. [online]. 2015, roč. 322–323, s. 218-225. [cit. 2017-3-4]. URL<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164814003548>>. ISSN 0043-1648
- [19] ARIAS-CUEVAS, O., Z. LI, R. LEWIS. A laboratory investigation on the influence of the particle size and slip during sanding on the adhesion and wear in the wheel–rail contact. *Wear*. [online]. 2011, roč. 271, s. 14-24. [cit. 2017-3-4]. URL<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164810003844>>. ISSN 0043-1648
- [20] SKLENÁŘ [online]. [cit. 2016-04-22]. URL<<http://www.sklenar-tribotechnika.cz>>
- [21] GALAS, R. *Modifikace tření v kontaktu kola a kolejnice*. Brno, 2015, 56 s. Pojednání ke státní doktorské zkoušce na Vysokém učení technickém na Ústavu konstruování. Vedoucí práce prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
- [22] TOMEOKA, M., N. KABE, M. TANIMOTO, E. MIYAUCHI, M. NAKATA. Friction control between wheel and rail by means of on-board lubrication. *Wear*. [online]. 2002, roč. 253, s. 124-129. [cit. 2017-3-4]. URL<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164802000911>>. ISSN 0043-1648
- [23] Tribotechnika. *Modifikace a regulace tření kola a kolejnice*. [online]. © 2016. [cit. 2016-04-22]. URL<<http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-1-2009/modifikace-a-regulace-treni-kola-a-kolejnice.html>>
- [24] MATSUMOTO, A., Y. SATO, H. ONO, Y. WANG, M. YAMAMOTO, M. TANIMOTO, Y. OKA. Creep force characteristics between rail and wheel on scaled model. *Wear*. [online]. 2002, roč. 253, s. 199-203. [cit. 2017-3-4]. URL<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004316480200100X>>. ISSN 0043-1648
- [25] EADIE, D. T., J. KALOUSEK, K. C. CHIDDICK. The role of high positive friction (HPF) modifier in the control of short pitch corrugations and related phenomena. *Wear*. [online]. 2002, roč. 253, s. 185-192. [cit. 2017-3-4]. URL<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164802000984>>. ISSN 0043-1648
- [26] EADIE, D. T., M. SANTORO. Top-of-rail friction control for curve noise mitigation and corrugation rate reduction. *Journal of Sound and Vibration*. [online]. 2006, roč. 293, s. 747-757. [cit. 2017-3-4]. URL<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X05007832>>. ISSN 0022-460X

- [27] EADIE, D. T., D. ELVIDGE, K. OLDKNOW, R. STOCK, P. POINTNER, J. KALOUSEK, P. KLAUSER. The effects of top of rail friction modifier on wear and rolling contact fatigue: Full-scale rail-wheel test rig evaluation, analysis and modelling. *Wear*. [online]. 2008, roč. 265, s. 1222-1230. [cit. 2017-3-4]. URL<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164808001695>>. ISSN 0043-1648
- [28] The Statistics Portal [online]. [cit. 2016-04-22]. URL< www.statista.com>
- [29] LI, Z., O. ARIAS-CUEVAS, R. LEWIS, E. A. GALLARDO-HERNÁNDEZ. Rolling-Sliding Laboratory Tests of Friction Modifiers in Leaf Contaminated Wheel-Rail Contacts. *Tribology Letters*. [online]. 2009, roč. 33, s. 97. [cit. 2017-3-4]. URL<<https://link.springer.com/article/10.1007/s11249-008-9393-3>>. ISSN 1573-2711
- [30] MILKOVIĆ, D. D., G. Ž. SIMIĆ, J. D. TANASKOVIĆ, V. J. LUČANIN, S. Z. RADULOVIĆ. Uncertainty of the Wheel-rail Angle of Attack Measurements Using Laser Based Wayside System. *FME TRANSACTIONS* [online]. 2017, roč. 45, č. 1, s. 69-76. [cit. 2017-5-10]. URL<http://www.mas.bg.ac.rs/_media/istrazivanje/fme/vol45/1/11_dmilkovid_et_al.pdf>. ISSN 2406-128X
- [31] GM/GN2642. *Guidance on Wheel/Rail Low Adhesion Measurement*. London: Rail Safety and Standards Board. 2008.
- [32] KHAN, S. A. *Top-Of-Rail Friction-Modifier (TOR-FM) Effects on Rail Curves* [online]. [cit. 2016-04-22]. URL<https://www.ltu.se/cms_fs/1.147575!/file/Khan%20Top-Of-Rail%20Friction-Modifier.pdf>.
- [33] DAVIS, K., W. STICKLAND. *Evaluation of a top-of-rail lubrication system*. 1. vyd. Washington, DC: U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, 1999. Technical report. [online]. [cit. 2017-3-4]. URL<https://books.google.cz/books?id=E0G2VLHWZJwC&pg=PA1&lpg=PA1&dq=SENTRAEN+2000+TOR%22&source=bl&ots=ldFI4NHTdq&sig=L7tz41KB9vD0TVbvvt19j8xEges&hl=cs&sa=X&ved=0ahUKEwjzvFT_pcrQAhXDHxoKHZUvCPIQ6AEIjAB#v=onepage&q&f=false>. DOT/FRA/ORD-99-13
- [34] THOMPSON, D. J., A. D. MONK-STEEL, C. J. C. JONES, P. D. ALLEN, S. S. HSU, S. D. IWNICKI. *Railway Noise: Curve Squeal, Roughness Growth, Friction and Wear*. 1. vyd. Birmingham: The university of Birmingham, Edgbaston, 2003. Rail Research UK report. RRUUK/A3/1

- [35] KATAORI, A., K.-I. DOI, H. IJIMA, S. MONOSAKI, K. HORIOKA. Development of Continuous Measurement Equipment for Angle of Attack and Results of Measurements. *JR East Technical Review*. [online]. 2011, roč. 19, s. 46-49. [cit. 2017-3-4]. URL<https://www.jreast.co.jp/e/development/tech/pdf_19/Tec-19-46-49eng.pdf>. ISSN 1347-8907
- [36] ČSN EN 13 262+A2. *Železniční aplikace – dvojkolí a podvozky – Kola – Požadavky na výrobek*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [37] ČSN EN 13674-2+A1. *Železniční aplikace – Kolej – Kolejnice – Část 2: Kolejnice pro výhybky a výhybkové konstrukce používané s Vignolovými železničními kolejnicemi o hmotnosti 46 kg/m a větší*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [38] LUBCON. *LUBCON Lubricants for Doors, Wheels, Wheel Set Bearings, Rails and Switches*. [online]. [cit. 2017-3-4]. URL<<http://www.lubcon.si/resources/Wheel-rail-1.pdf>>
- [39] *Brněnská MHD* [online]. [cit. 2016-04-22]. URL<<http://www.bmhd.cz/>>
- [40] *SKD TRADE* [online]. [cit. 2016-04-22]. URL<<http://www.skd.cz/>>
- [41] *Pragoimex* [online]. [cit. 2016-04-22]. URL<<http://www.pragoimex.cz/>>
- [42] *MĚSTSKÁ DOPRAVA* [online]. [cit. 2016-04-22]. URL<<http://www.mestskadoprava.net/>>
- [43] LEWIS, S. R., R. LEWIS, U. OLOFSSON, D. T. EADIE, J. COTTER, X. LU. Effect of humidity, temperature and railhead contamination on the performance of friction modifiers: Pin-on-disk study. *Journal of Rail and Rapid Transit* [online]. 2012, roč. 227, s. 115-127. [cit. 2016-04-22]. URL<<http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0954409712452239>>. ISSN 2041-3017
- [44] STACHOWIAK, G. *Engineering tribology*. 3. vyd. Amsterdam: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005, 801 s. ISBN 07-506-7836-4.
- [45] STEIMEL, Andreas. *Electric-Traction Motive Power and Energy Supply*. 1. vyd. Mnichov: Oldenbourg Industrieverslag GmbH, 2008. 335 s. ISBN 978-3-8356-3132-8
- [46] AREIZA, Y.A., S.I. GARCÉS, J.F. SANTA, G. VARGAS, A. TORO. Field measurement of coefficient of friction in rails using a hand-pushed tribometer. *Tribology International* [online]. 2015, roč. 82, s. 274-279. [cit. 2016-04-22]. URL<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X14003041>>. ISSN 0301-679X

- [47] LATA, Michael. *Konstrukce kolejových vozidel II*. 1. vyd. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2004. ISBN 80-7194-696-6
- [48] KERN [online]. [cit. 2016-04-22]. URL< <http://vahy-kern.cz/>>
- [49] CHIDDICK, Kelvin. Positive friction control composition for railways. US Patent No. 6136757. 2000.
- [50] KUMAR, Sudhir. Top-of-rail lubrication rate control by the hydraulic pulse width modulation method. US Patent No. 1999048743. 1999.
- [51] ARIAS-CUEVAS, O., Z. LI, R. LEWIS, E. A. GALLARDO-HERNÁNDEZ. Rolling–sliding laboratory tests of friction modifiers in dry and wet wheel–rail contacts. *Wear*. [online]. 2010, roč. 268, s. 543-551. [cit. 2017-3-4]. URL< <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164809005420>>.ISSN 0043-1648

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

μ		součinitel adheze
R_m		Požadované množství modifikátoru
K		Konstanta hardwaru
K_D		Konstanta zakřivení tratě
D		Úhel náběhu
C_L		Konstanta okolní teploty
T		Okolní teplota
N_W		Celková hmotnost vagónů
T	[N]	tečná síla
Q	[N]	normálová síla
v	[m/s]	dopředná rychlost vozidla
w	[m/s]	skluzová rychlost
R	[m]	poloměr kola
ω	[rad/s]	úhlová rychlost
γ	[%]	relativní skluz
γ_x	[%]	složka relativního skluзу v tečném směru
γ_y	[%]	složka relativního skluзу v příčném směru
μ_0	[-]	Součinitel adheze
μ_{stat}	[-]	Statický součinitel smykového tření
τ_w	[Pa]	Smyková pevnost materiálu kola
τ_R	[Pa]	Smyková pevnost materiálu kolejnice
a	[m]	Hlavní poloosa eliptické kontaktní oblasti
b	[m]	Vedlejší poloosa eliptické kontaktní oblasti
N	[N]	Normálová zátěžná síla
R'	[m]	Redukovaný poloměr křivosti
R_a	[m]	Redukovaný poloměr křivosti tělesa A
R_b	[m]	Redukovaný poloměr křivosti tělesa B
R_{ax}	[m]	Redukovaný poloměr křivosti tělesa A ve směru osy x
R_{bx}	[m]	Redukovaný poloměr křivosti tělesa B ve směru osy x
R_{ay}	[m]	Redukovaný poloměr křivosti tělesa A ve směru osy y
R_{by}	[m]	Redukovaný poloměr křivosti tělesa B ve směru osy y
W	[N]	Zátěžná síla
E'	[Pa]	Redukovaný Youngův modul pružnosti
E_A	[Pa]	Youngův modul pružnosti třecího povrchu tělesa A
E_B	[Pa]	Youngův modul pružnosti třecího povrchu tělesa B
ν_A	[-]	Poissonova konstanta třecího povrchu tělesa A
ν_B	[-]	Poissonova konstanta třecího povrchu tělesa B
$\bar{\epsilon}$	[-]	Zjednodušený eliptický integrál
\bar{k}	[-]	Eliptický parametr
α	[°]	Úhel náběhu kola vodící nápravy
d	[m]	Rozvor náprav vozu nebo náprav jednotlivých podvozků
r	[m]	Poloměr zakřivení vnější kolejnice
R_{td}	[m]	Poloměr disku na dvoudiskovém zařízení (40 mm)
d_{td}	[m]	Šířka kontaktní oblasti na disku dvoudiskového zařízení
d_{kol}	[m]	Uvažovaná šířka kontaktní oblasti na kolejnici
L_{kol}	[m]	Délka uvažované kolejnice

T_{td}	[m]	Trvanlivost vrstvy modifikátoru na dvoudiskovém zařízení
T_{kol}	[m]	Trvanlivost utvořené vrstvy na uvažované kolejnici
T_{os}	[m]	Úběr životnosti dané vrstvy na kolejnici od jedné nápravy
S_{td}	[m ²]	Celková plocha kontaktní oblasti na dvoudiskovém zařízení
S_{td}	[m ²]	Uvažovaná modifikovaná plocha na hlavě kolejnice
V_{td}	[m ³]	Požadované množství modifikátoru z dvoudiskového zařízení
V_{kol}	[m ³]	Reálné množství modifikátoru pro uvažovanou kolejnici
m_{kol}	[kg]	Hmotnost množství modifikátoru pro uvažovanou kolejnici
N_{vrst}		Počet náprav do konce životnosti utvořené vrstvy modifikátoru

9 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 1 Síly v kontaktu kola a kolejnice [5]	14
Obr. 2 Trakční křivka a složení kontaktní plochy – upraveno podle [3]	15
Obr. 3 a) kontaktní plocha, b) rychlosti a síly působící na kolo odvalování [3]	15
Obr. 4 Skluzové rychlosti na kole pohybujícím se	16
Obr. 5 Třecí vrstva [2]	17
Obr. 6 Vliv sloučenin na smykové napětí třecí vrstvy [6]	17
Obr. 7 Výsledky experimentů za suchého a vodou kontaminovaného kontaktu [8]	18
Obr. 8 Schéma dvoudiskového zařízení [4]	20
Obr. 9 a) Full scale rig [9], b) wheel on rail [10]	20
Obr. 10 a) Pin on disc reometr [13], b) MTM [12]	21
Obr. 11 Parametry ovlivňující adhezi v kontaktu	22
Obr. 12 Vliv rychlosti na součinitel adheze [14]	22
Obr. 13 Výsledky Zhangova experimentu [9]	23
Obr. 14 Vliv úhlu náběhu kola [14]	23
Obr. 15 Vliv relativní vlhkosti vzduchu a teploty [7]	26
Obr. 16 Hodnoty součinitele adheze při různých kontaminantech (vlevo), tvrdá těžce odstranitelná vrstva uježděného listí (vpravo) [17]	27
Obr. 17 Vliv množství aplikovaného písku na adhezi v kontaktu (vlevo), opětovný pokles adheze po ukončení pískování (vpravo) [18]	27
Obr. 18 Výsledky aplikace HPF modifikátoru v podélném (a,b) a laterálním (c,d) směru [24]	31
Obr. 19 Vliv modifikátoru tření na hladinu hlukové emise vybraných tratí [26]	31
Obr. 20 Nárůst vlnkovitého opotřebení po ukončení aplikace modifikátoru [26]	32
Obr. 21 a) změna profilu kolejnice, b) hmotnostní úbytek kolejnice, c,d) trhlina na povrchu kolejnice [27]	33
Obr. 22 a) analýza velikosti částic, b) vliv modifikátorů na obnovu adheze [29]	34
Obr. 23 Postup řešení této práce	39
Obr. 24 Použité experimentální zařízení	40
Obr. 25 Schéma experimentálního zařízení	40
Obr. 26 Měřicí řetězec experimentálního zařízení [21]	41
Obr. 27 Úhel náběhu kol do traťového oblouku [35]	43
Obr. 28 Pozice hlukoměru během experimentů	44
Obr. 29 Rozbor částic modifikátoru Sintono Terra HLK [11]	46
Obr. 30 Příprava listového extraktu	47
Obr. 31 Laboratorní váha Kern [48]	48
Obr. 32 Způsob aplikace modifikátoru tření	49
Obr. 33 Výsledek experimentu a způsob jeho zpracování	50
Obr. 34 Schéma řídicího systému off-board jednotky	51
Obr. 35 Vyhodnocovací algoritmus off-board jednotky	53
Obr. 36 Opotřebení disk	53
Obr. 37 Vliv záběhového otěru	54
Obr. 38 aplikace a výtlak modifikátoru tření	54
Obr. 39 a) Výsledky experimentu vlivu rychlosti na adhezi, b) Závislost adheze na změně rychlosti	55
Obr. 40 a) Výsledky vlivu zatížení na adhezi, b) Závislost adheze na zatížení	55
Obr. 41 Trakční křivka	56

Obr. 42 a) Výsledky experimentu vlivu úhlu náběhu kola, b) Závislost adheze na úhlu náběhu kola	56
Obr. 43 Porovnání experimentu s predikčními vztahy	57
Obr. 44 a) Výsledky experimentu vlivu množství modifikátoru na adhezi, b) Závislost gradientu růstu adheze na aplikovaném množství modifikátoru	57
Obr. 45 a) Výsledky experimentu vlivu skluzu s aplikací modifikátoru, b) Závislost gradientu růstu adheze na skluzu v kontaktu s modifikátorem	58
Obr. 46 a) Výsledky experimentu vlivu rychlosti s aplikací modifikátoru, b) Závislost gradientu růstu adheze na rychlosti v kontaktu s modifikátorem	58
Obr. 47 a) Výsledky experimentu vlivu úhlu náběhu disku s aplikací modifikátoru, b) Vliv úhlu náběhu kola v kontaktu s modifikátorem na gradient růstu adheze	59
Obr. 48 Vliv množství modifikátoru na adhezi při kontaminaci vodou	59
Obr. 49 Vliv modifikátoru na list. extraktem kontaminovaný kontakt	60
Obr. 50 Vliv komerčních modifikátorů tření na adhezi ve: a) vodou kontaminovaném, b) suchém kontaktu	60
Obr. 51 Vliv kontaktních podmínek na minimální adhezi	61
Obr. 52 Vliv množství modifikátoru a skluzové rychlosti na gradient růstu adheze	62
Obr. 53 Výsledky redistribučního experimentu	62
Obr. 54 Vliv modifikátoru a úhlu náběhu na hladinu akustického tlaku	63
Obr. 55 Vliv množství modifikátoru na průběh hladiny akustického tlaku a adheze	64
Obr. 56 Opotřebení hlavy kolejnice	66
Obr. 57 Průběh a výsledky experimentu na reálné trati	67

10 SEZNAM TABULEK

Tab. 1	Hodnoty součinitele adheze vhodné pro provoz kolejového vozidla [31]	21
Tab. 2	Průměrné hodnoty součinitele adheze pro vybrané experimenty [14,15]	26
Tab. 3	Přehled nastavení parametrů experimentálního zařízení	41
Tab. 4	Srovnání vlastností kontaktních těles [35-37]	45
Tab. 5	Životnosti třecí vrstvy modifikátoru	62
Tab. 6	Zadání úlohy a experimentu	66

11 SEZNAM PŘÍLOH

11

Příloha 1	Seznam experimentů
Příloha 2	Článek publikovaný v konferenčním sborníku

PŘÍLOHA 1

Seznam experimentů a nastavení kontaktních podmínek

název	zatížení [GPa]	rychlost [m/s]	skluz [%]	úhel náběhu [°]	modifikátor	množství modifikátoru [μl]	kontaminant
vliv skluzu	0,8	1	1; 3; 5; 8	0	—	—	—
vliv úhlu náběhu	0,8	1	8	0; 2; 4; 6; 8; 10	—	—	—
vliv rychlosti	0,8	0,5; 1; 1,5; 2; 2,5	8	0	—	—	—
vliv zatížení	0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1	1	8	0	—	—	—
vliv množství modifikátoru	0,8	1	8	0	Lubcon	1; 2; 3; 6	—
vliv rychlosti	0,8	0,5; 1; 1,5; 2	8	0	Lubcon	2	—
vliv skluzu	0,8	1	1; 3; 5; 8	0	Lubcon	2	—
vliv úhlu náběhu	0,8	1	8	0; 2; 4; 6; 8; 10	Lubcon	2	—
vliv množství modifikátoru	0,8	1	8	0	Lubcon	0; 1; 4	voda
vliv množství modifikátoru	0,8	1	8	0	Lubcon	0; 1; 4	listový extrakt
srovnání komerčních modifikátorů	0,8	1	8	0	Lubcon; FM1; FM2; FM3	2	—
srovnání komerčních modifikátorů	0,8	1	8	0	Lubcon; FM1; FM2; FM3	2	voda
vliv skluzové rychlosti a množství modifikátoru	0,8	0,5; 1; 1,5; 2;	1; 3; 5; 8	0	Lubcon	0; 1; 2; 4; 6	—
vliv modifikátoru na hluk. emisi	0,8	1	8	0; 2; 4; 6; 8	Lubcon	0; 1	—
vliv modifikátoru na hluk. emisi	0,8	1	8	4	Lubcon	1; 2; 3; 4	—